



PRODUÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS BIM DE ARMADURAS DE BETÃO ARMADO ? PORMENORIZAÇÃO E MEDIÇÃO

JOÃO PEDRO MIRANDA FERNANDES

novembro de 2016

PRODUÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS BIM DE ARMADURAS DE BETÃO ARMADO – PORMENORIZAÇÃO E MEDIÇÃO

JOÃO PEDRO MIRANDA FERNANDES

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Ricardo Manuel Pereira Santos

Supervisor: José Carlos Basto Lino (NEWTON – Consultores de Engenharia)

OUTUBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

| | |
|-----------------------------------------------|-------|
| Índice Geral | iii |
| Resumo..... | v |
| Abstract | vii |
| Agradecimentos | ix |
| Índice de Texto | xi |
| Índice de Figuras..... | xiii |
| Índice de Tabelas..... | xxiii |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 2 Estado da Arte | 5 |
| 3 Aplicação de Software..... | 63 |
| 4 Produção Automática de Modelos BIM | 159 |
| 5 Considerações Finais | 183 |
| Referências Bibliográficas | 187 |
| Anexo I – Caso de Estudo 2 | 193 |
| Anexo II – Caso de Estudo 3 | 241 |

RESUMO

O presente relatório de estágio desenvolve a base do tema produção automática de modelos BIM de armaduras em elementos de betão armado e, como tal, apresenta a metodologias atuais para desenvolvimento desta atividade e as grandes finalidades da sua aplicação. O estudo aprofunda na temática da criação de ferramentas próprias para a modelação automática de armaduras, com uma revisão prévia às capacidades de alguns dos *softwares* atuais, com ferramentas de modelação de armaduras, e aos propósitos da mesma, apontando as mais valias e as limitações dos mesmos nesta área. É testada a ideia da pormenorização em função dos regulamentos europeus aplicáveis e da extração de quantidades materiais em conjunto com informação adicional relevante para a temática desenvolvida, realizando testes na área do dimensionamento estrutural, na produção de documentação, desenhos de pormenor e interoperabilidade na passagem de dados e modelos entre os diversos aplicativos.

A metodologia BIM é uma das grandes bases de apoio desta dissertação porque é a partir da mesma que é alcançado o objetivo de integração das diversas áreas sobre o modelo tridimensional base, analisando o grau de eficiência com que é conseguida essa passagem de dados e quais os desafios que se colocam à correta aplicação do método BIM dentro do tema desenvolvido.

Palavras-chave: BIM, Dimensionamento, Modelação, Armaduras de betão armado.

ABSTRACT

This internship report develops the basis on the subject of automatic production of rebar BIM models for reinforced concrete elements theme, and as such presents the current methodologies for the development of this activity and the major purposes of its application. The study expands on the theme of self-created tools for automatic reinforcement modeling, with a prior summary to the capabilities of some of today's software, with rebar modeling tools, and their purposes, pointing out the gains and the limitations of their use on the field. The ideas of rebar detailing according to the applicable European regulations, and the extraction of the material quantities are tested, along with additional content relevant for the developed theme. Tests on the fields of structural design, production of documentation, detail drawings and in the data transfer interoperability of models between different applications were also performed.

BIM methodology is one of the major bases of support of this thesis because it is from it that the goal of the integration of the various areas on the base three-dimensional model is achieved, analyzing the degree of efficiency that is achieved on data interchanging and what are the challenges arising from the correct application of BIM method within the developed theme.

Keywords: BIM, Analysis, Modeling, Structures, Rebars, Reinforced Concrete.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer ao ISEP pela formação e pelo ensino de qualidade que providencia aos seus alunos e sem o qual não teria chegado ao patamar académico em que me encontro, ao meu orientador Ricardo Manuel Pereira Santos que se mostrou sempre disponível para dedicar algum do seu tempo e ajudar com o desenvolvimento de todo o trabalho aqui apresentado, à empresa Newton – Consultores de Engenharia e ao Engenheiro José Carlos Basto Lino pela oportunidade que me concederam e por todo o conhecimento e experiência que me transmitiram, à minha família que me permitiu ingressar no ensino superior e me apoiou durante todo o percurso académico.

Faço uma dedicatória especial à Ana Francisca Sarmento de Oliveira Paradela, comigo durante todo o meu percurso e sempre com um sorriso e uma palavra de conforto nos lábios, dando o seu apoio incondicional e partilhando dos melhores e dos piores momentos de todo este trajeto académico e pessoal.

Obrigado a todos aqueles que em algum momento me deram o seu apoio e espero que se houver algum dia que precisem, eu esteja lá para vos apoiar de igual modo.

“You never change things by fighting the existing reality. To change something, build a new model that makes the existing model obsolete.”

R. Buckminster Fuller

ÍNDICE DE TEXTO

| | | |
|-------|---------------------------------------------------|----|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Enquadramento | 1 |
| 1.2 | Metodologias e Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Instalação de Acolhimento | 3 |
| 1.4 | Estrutura do Relatório | 4 |
| 2 | Estado da Arte..... | 5 |
| 2.1 | BIM..... | 5 |
| 2.1.1 | Conceitos Básicos | 9 |
| 2.1.2 | Interoperabilidade | 15 |
| 2.1.3 | <i>Shanghai Tower</i> um caso de sucesso BIM..... | 19 |
| 2.1.4 | Panorama de aplicação BIM | 20 |
| 2.2 | Análise Estrutural e Dimensionamento | 21 |
| 2.2.1 | Regulamentos..... | 22 |
| 2.2.2 | Programas de análise e dimensionamento | 43 |
| 2.3 | Modelação | 49 |
| 2.3.1 | Programas de modelação BIM | 51 |
| 2.3.2 | Formatos de Partilha de Dados | 56 |
| 3 | Aplicação de Software..... | 63 |
| 3.1 | Casos de Estudo | 63 |
| 3.2 | Análise e Dimensionamento | 68 |
| 3.2.1 | ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 2017 | 69 |
| 3.2.2 | PAC Pórticos..... | 92 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 | Modelação | 102 |
| 3.3.1 | REVIT 2016/2017 | 103 |
| 3.3.2 | ADVANCE CONCRETE 2017 | 121 |
| 3.3.3 | TEKLA STRUCTURES LEARNING 2016..... | 131 |
| 3.4 | Programação | 144 |
| 3.4.1 | MS-Excel com Visual Basic | 145 |
| 3.4.2 | Dynamo..... | 155 |
| 4 | Produção Automática de Modelos BIM | 159 |
| 4.1 | Add-in para Criação Assistida de Armaduras de Betão Armado..... | 159 |
| 4.1.1 | Vigas..... | 161 |
| 4.1.2 | Pilares..... | 168 |
| 4.1.3 | Lajes Maciças | 174 |
| 4.2 | Orçamentação..... | 180 |
| 5 | Considerações Finais | 183 |
| 5.1 | Conclusões | 183 |
| 5.2 | Desenvolvimentos Futuros | 185 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Logótipos da empresa de acolhimento e dos restantes gabinetes | 3 |
| Figura 2.1 – BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício (Lloyd's Register) | 5 |
| Figura 2.2 – Tempo de vida de um Edifício com manutenção regular (Carlos Rodrigues) | 6 |
| Figura 2.3 – Imagem representativa da passagem do papel para a realidade (Bouygues) | 8 |
| Figura 2.4 – Esquema de níveis de aplicação BIM (3D Perspectives)..... | 10 |
| Figura 2.5 – Esquema com dimensões BIM mais utilizadas atualmente | 11 |
| Figura 2.6 – Exemplo de evolução do Level of Detail num objeto (practical BIM) | 12 |
| Figura 2.7 – Exemplo de evolução do LOMD aplicado a um empreendimento (evolveconsultancy)..... | 14 |
| Figura 2.8 – Exemplo de aplicação do LOD a um elemento de betão armado (Óscar Liébana) | 15 |
| Figura 2.9 – Interoperabilidade como uma ponte de comunicação (echotech)..... | 16 |
| Figura 2.10 – IFC como junção das diferentes especialidades num modelo BIM (BuildingSMART) | 17 |
| Figura 2.11 – Cruzamento de formatos num modelo BIM..... | 18 |
| Figura 2.12 – Shanghai Tower, China (Arch2O)..... | 19 |
| Figura 2.13 – Planta Estrutural de um dos pisos da Shanghai Tower (Arch2O) | 19 |
| Figura 2.14 – Produtividade de projeto durante a implementação do sistema BIM (Hugo Sousa) | 20 |
| Figura 2.15 – Ciclo de modelação e análise (Autodesk) | 21 |
| Figura 2.16 – Relação esquemática entre Eurocódigos e a sua base de aplicação..... | 22 |
| Figura 2.17 –Sobreposições adjacentes (Figura 8.7 do EC2)..... | 25 |
| Figura 2.18 – Tipos de amarração para além da de prolongamento reto (Figura 8.1 do EC2) | 26 |
| Figura 2.19 – Amarração de cintas (caso a) e b)) (Figura 8.5 do EC2) | 27 |
| Figura 2.20 – Disposição da armadura de tracção numa secção em T (Figura 9.1 do EC2) | 31 |
| Figura 2.21 – Representação da interrupção da armadura longitudinal (Figura 9.2 do EC2) | 32 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.22 – Amarração das armaduras inferiores em apoios extremos (Figura 9.3 do EC2) | 32 |
| Figura 2.23 – Amarração em apoios intermédios (Figura 9.4 a) do EC2) | 33 |
| Figura 2.24 – Amarração em apoios intermédios (Figura 9.4 do EC2) | 33 |
| Figura 2.25 – Exemplos de armaduras de esforço transverso (Figura 9.5 do EC2) | 34 |
| Figura 2.26 – Exemplos de formas de cintas de torção (Figura 9.6 do EC2) | 35 |
| Figura 2.27 – Notações e definições utilizadas na secção 6.3 (Figura 6.11 do EC2) | 36 |
| Figura 2.28 – Colocação de armadura de suspensão na zona de intersecção de duas vigas (vista em planta) (Figura 9.7 do EC2) | 37 |
| Figura 2.29 – Armaduras de bordo livre numa laje (Figura 9.8 do EC2)..... | 38 |
| Figura 2.30 – Nó com a face interior comprimida. Modelo de cálculo e armaduras (Figura J.2 do EC2) .. | 41 |
| Figura 2.31 – Nó com a face interior comprimida. Modelo de cálculo e armaduras (Figura J.2 do EC2) .. | 41 |
| Figura 2.32 – Nó com a face interior moderadamente tracionada (por exemplo, $A_{sbh} \leq 2\%$) (Figura J.3 do EC2) | 42 |
| Figura 2.33 – Nó com a face interior fortemente tracionada (por exemplo, $A_{sbh} > 2\%$) (Figura J.3 do EC2) | 42 |
| Figura 2.34 – Alguns dos programas de cálculo e análise estrutural mais solicitados..... | 43 |
| Figura 2.35 – SAP2000 | 44 |
| Figura 2.36 – STAAD.Pro..... | 45 |
| Figura 2.37 – RISA-3D e o procedimento de integração entre módulos de dimensionamento e análise . | 46 |
| Figura 2.38 – Módulo RISACconnection e componente RISA><REVIT Link | 46 |
| Figura 2.39 – ETABS 2015 | 47 |
| Figura 2.40 – SkyCiv Structural 3D..... | 48 |
| Figura 2.41 – Grelha de avaliação e comparação de software BIM (G2 Crowd)..... | 49 |
| Figura 2.42 – Exemplo de armaduras BIM modeladas em Revit (Autodesk) | 50 |
| Figura 2.43 – Software para modelação e pormenorização de armaduras | 51 |
| Figura 2.44 – Advance Concrete, interface e exemplo de modelação de sapatas (Construction Cost) | 52 |
| Figura 2.45 – ProConcrete, interface e exemplo de modelação de armaduras..... | 53 |
| Figura 2.46 – ProRebar, interface e exemplo de deteção de conflitos | 54 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.47 – PowerPack | 55 |
| Figura 2.48 – Formatos de interoperabilidade (Marco Almeida)..... | 56 |
| Figura 2.49 – Logótipo IFC..... | 57 |
| Figura 2.50 – Logotipo BCF e exemplo hipotético de aplicação do ficheiro ([open]BIMer) | 58 |
| Figura 2.51 – Exemplo de ficheiro COBie | 59 |
| Figura 2.52 – Exemplo de modelação/criação em formato DWG no AutoCAD (Lúcia Paixão)..... | 60 |
| Figura 3.1 – Caso de estudo 1 | 63 |
| Figura 3.2 – Caso de Estudo 2 | 64 |
| Figura 3.3 – Vista em Alçado da ligação entre as duas estruturas..... | 65 |
| Figura 3.4 – Vigas do caso de estudo 2 | 65 |
| Figura 3.5 – Pilares do caso de estudo 2 | 66 |
| Figura 3.6 – Caso de estudo 3 | 67 |
| Figura 3.7 – Imagens de apresentação dos respetivos programas | 68 |
| Figura 3.8 – Exemplo de desenho de pormenor de armaduras..... | 69 |
| Figura 3.9 – Menu para definição das preferências de trabalho | 69 |
| Figura 3.10 – Parâmetros padrão para definição de esforços e características geométricas adicionais... | 70 |
| Figura 3.11 – Menu para definição do coeficiente de encurvadura | 71 |
| Figura 3.12 – Parâmetros adicionais em pilares..... | 72 |
| Figura 3.13 – Menu de definição dos parâmetros de cálculo para vigas e pilares | 72 |
| Figura 3.14 - Menu de definição dos parâmetros de cálculo para lajes/paredes..... | 73 |
| Figura 3.15 – Exemplo da interface em modo de criação de barras..... | 74 |
| Figura 3.16 – Comparação entre métodos de análise I – Esforços de flexão..... | 76 |
| Figura 3.17 – Comparação entre métodos de análise II – Esforços Transversos | 77 |
| Figura 3.18 – Exemplos de ligação entre uma viga e uma parede..... | 77 |
| Figura 3.19 – Layout da interface para cálculo do required reinforcement para elementos barra em B.A. | 78 |
| Figura 3.20 – Layout da interface para cálculo do required reinforcement para painéis em B.A. | 82 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.21 – Layout da interface do provided reinforcement para vigas | 83 |
| Figura 3.22 – Análise de resultados de dimensionamento de armaduras em elemento barra em Robot | 84 |
| Figura 3.23 – Opções de cálculo gerais para vigas | 85 |
| Figura 3.24 – Menu Reinforcement Pattern do Robot..... | 86 |
| Figura 3.25 – Exemplos de modelação de armaduras em vigas e pilares do Caso de Estudo 1 | 87 |
| Figura 3.26 – Exemplo de modelação e desenho para lajes em Robot..... | 88 |
| Figura 3.27 – Comparação entre resultados de flexão de diferentes módulos em Robot | 89 |
| Figura 3.28 – Exemplo de desenho técnico produzido em Robot..... | 90 |
| Figura 3.29 – Nota de cálculo para um conjunto de pilares em Robot..... | 91 |
| Figura 3.30 – Apresentação do PAC – Pórticos | 92 |
| Figura 3.31 – Comparação entre a interface de apresentação de modelos estruturais..... | 93 |
| Figura 3.32 – Menus de caracterização estrutural | 93 |
| Figura 3.33 – Criação de secções – Simulação de Paredes e vigas de compatibilização de pórticos..... | 94 |
| Figura 3.34 – Parâmetros para dimensionamento de vigas e pilares | 95 |
| Figura 3.35 – Parâmetros base para cálculo de ações horizontais..... | 96 |
| Figura 3.36 – Menu Pórticos – opções de interação | 97 |
| Figura 3.37 – Comparação de diagramas entre PAC – Pórticos e Robot Structural Analysis..... | 98 |
| Figura 3.38 – Exemplo de relatórios e quadros informativos em PAC..... | 99 |
| Figura 3.39 – Exemplo de solução adaptada em pilares (Simulação de parede)..... | 100 |
| Figura 3.40 – Exemplo de desenhos automáticos criados pelo PAC..... | 100 |
| Figura 3.41 – Pormenor de viga em 3D criada a partir de dados PAC (Raul Sousa, 2015)..... | 101 |
| Figura 3.42 – Caso de estudo 1 modelado em diferentes programas | 102 |
| Figura 3.43 – Layout de interface de modelação de elementos estruturais em Revit..... | 103 |
| Figura 3.44 – Definição de Lajes e Paredes como elementos estruturais..... | 103 |
| Figura 3.45 – Exemplo de modelo analítico criado em Revit | 104 |
| Figura 3.46 – Comparação entre dois elementos modelados em Revit | 105 |
| Figura 3.47 – Navegador de materiais em Revit | 106 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.48 – Exemplo de definição de camadas materiais em lajes | 106 |
| Figura 3.49 – Exemplos de Ligação entre vigas e pilares | 107 |
| Figura 3.50 – Exemplo de criação de estruturas e do seu modelo analítico..... | 107 |
| Figura 3.51 – Menu para ajuste de elementos analíticos | 108 |
| Figura 3.52 – Exemplo de falhas de união entre elementos analíticos em Revit..... | 109 |
| Figura 3.53 – Exemplo de integração Robot-Revit..... | 109 |
| Figura 3.54 – Possibilidade de introdução manual de armadura numa viga | 110 |
| Figura 3.55 – Definição de planos de trabalho na criação de varões e cintas de aço..... | 111 |
| Figura 3.56 – Opções para definição de uma barra | 111 |
| Figura 3.57 – Exemplo de sobreposição de varões longitudinais em vigas (corte transversal da peça) . | 112 |
| Figura 3.58 – Exemplo de objetos com armaduras em Revit..... | 112 |
| Figura 3.59 – Exemplo de armadura com dispensa numa laje armada numa só direção | 113 |
| Figura 3.60 – Exemplo de pormenor de ligação..... | 114 |
| Figura 3.61 – Extensão para Armadura de elementos estruturais em Revit | 114 |
| Figura 3.62 – Interface para definição de armaduras em vigas com a extensão para Revit..... | 115 |
| Figura 3.63 – Interface e exemplo de modelação em pilares com a extensão em Revit..... | 115 |
| Figura 3.64 – Integração Robot-Revit do caso de estudo 2 | 116 |
| Figura 3.65 – Exemplo de integração de armaduras em Revit a partir do Robot | 117 |
| Figura 3.66 – Exemplo de vão de cálculo atribuído em Robot..... | 117 |
| Figura 3.67 – Pormenor de amarração de um pilar armado integrado em Revit a partir do Robot | 118 |
| Figura 3.68 – Exemplo de Inventário de varões | 119 |
| Figura 3.69 – Exemplo de desenho tipo produzido em Revit | 119 |
| Figura 3.70 – Exemplo de exportação de vistas Revit para AutoCAD | 120 |
| Figura 3.71 – Menus adicionais Advance Concrete..... | 121 |
| Figura 3.72 – Exemplos de semelhanças entre o Advance Concrete e outros programas da Autodesk . | 122 |
| Figura 3.73 – Menu Piloto | 122 |
| Figura 3.74 – Modos criação de armaduras – Elemento a elemento | 123 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.75 – Menu para criação de soluções automáticas | 124 |
| Figura 3.76 – Modo de modelação dinâmico | 125 |
| Figura 3.77 – Exemplo de problema da criação automática de armaduras..... | 126 |
| Figura 3.78 – Demonstração do 3D Viewer do Advance Concrete | 126 |
| Figura 3.79 – Modelo de Armaduras Advance Concrete..... | 127 |
| Figura 3.80 – Vistas 3D | 128 |
| Figura 3.81 – Exemplos de interoperabilidade Revit↔Advance Concrete | 129 |
| Figura 3.82 – Bill Of Materials (BOM) do Advance Concrete | 130 |
| Figura 3.83 – Exemplo de interface e definição de vistas em Tekla Structures Learning 2016 | 132 |
| Figura 3.84 – Menus para criação de elementos em aço ou betão | 132 |
| Figura 3.85 – Bibliotecas de materiais e secções, e menu de propriedades de uma viga de betão | 133 |
| Figura 3.86 – Exemplo de ligação entre vigas de betão | 133 |
| Figura 3.87 – Importação do modelo do caso de estudo 2 em formato .IFC para Tekla | 134 |
| Figura 3.88 – Reconhecimento de dados na importação de modelos em diferentes formatos..... | 134 |
| Figura 3.89 – Exemplo de importação “bem-sucedida” | 135 |
| Figura 3.90 – Conversão de modelo IFC com armaduras em Tekla Structures Learning 2016..... | 136 |
| Figura 3.91 – Exemplo de armadura longitudinal personalizada | 137 |
| Figura 3.92 – Interface de modelação de armaduras em Tekla | 137 |
| Figura 3.93 – Exemplo de modelação de armaduras | 138 |
| Figura 3.94 – Exemplo de modelação de malhas de armaduras..... | 138 |
| Figura 3.95 – Malha ortogonal com dispensa | 139 |
| Figura 3.96 – Exemplo de extensões Tekla para modelação de armaduras | 139 |
| Figura 3.97 – Caso de estudo 1 modelado em Tekla..... | 140 |
| Figura 3.98 – Criação de desenhos em Tekla | 141 |
| Figura 3.99 – Criação de listas de materiais | 142 |
| Figura 3.100 – Organizador Tekla..... | 142 |
| Figura 3.101 – Exportação de IFC a partir do Tekla | 143 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.102 – Exemplo de folha de cálculo para determinação da pressão do vento segundo o EC1-4 | 144 |
| Figura 3.103 – Exemplo de aplicação do Dynamo na modelação de uma estrutura em Revit..... | 144 |
| Figura 3.104 – Exemplo de determinação das restantes cargas permanentes em pisos interiores..... | 147 |
| Figura 3.105 – Janela para habilitação de referências para um projeto VBA | 148 |
| Figura 3.106 – Apresentação do layout de algumas das páginas da folha de cálculo | 153 |
| Figura 3.107 – Exemplo e userform criado para o dimensionamento de lajes..... | 154 |
| Figura 3.108 – Formula wizard do Results Connect | 154 |
| Figura 3.109 – Nós necessários para importar informação do Excel | 155 |
| Figura 3.110 – Nós utilizados para criação de paredes em Dynamo (Continuação da Figura 3.109)..... | 156 |
| Figura 3.111 – Modelação de uma laje estrutural em Revit pelo Dynamo..... | 156 |
| Figura 3.112 – Exemplos de criação de massas complexas em Revit a partir do Dynamo | 157 |
| Figura 3.113 – Programação em Dynamo – Rotinas para criação de um modelo estrutural em Revit... | 158 |
| Figura 3.114 – Comparação de modelos estruturais | 158 |
| Figura 4.1 – Modelação de armaduras em pilares de geometria irregular (Dieter Vermeulen, 2015) ... | 160 |
| Figura 4.2 – Importação de dados de vigas para MS-Excel | 161 |
| Figura 4.3 – Dimensionamento de vigas em MS-Excel..... | 162 |
| Figura 4.4 – Esquemas de distribuição de armaduras ao longo do vão segundo o EC2 | 164 |
| Figura 4.5 – Distribuições de extensões admissíveis no estado limite último (EC2)..... | 165 |
| Figura 4.6 – Modelação de armaduras em vigas – Dynamo/Revit..... | 166 |
| Figura 4.7 – Vistas e modelo 3D de uma viga com armaduras modeladas a partir do Dynamo | 166 |
| Figura 4.8 – Script para criação de modelos de armaduras em vigas | 167 |
| Figura 4.9 – Importação de dados de pilares para MS-Excel | 168 |
| Figura 4.10 – Elementos isolados sujeitos a um esforço normal excêntrico ou a uma força transversal | 169 |
| Figura 4.11 – Dimensionamento de pilares em MS-Excel..... | 171 |
| Figura 4.12 – Modelação de armaduras em pilares – Dynamo/Revit..... | 173 |
| Figura 4.13 – Vista conjunta dos modelos de armaduras de vigas com os dos pilares | 174 |
| Figura 4.14 – Vistas e modelo 3D de um pilar com armaduras | 174 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.15 – Importação de dados de lajes para MS-Excel | 175 |
| Figura 4.16 – Opções de verificação na folha de cálculo para lajes | 176 |
| Figura 4.17 – Dimensionamento de lajes em MS-Excel | 176 |
| Figura 4.18 – Modelação de armaduras em lajes – Dynamo/Revit | 178 |
| Figura 4.19 – Vistas e modelo 3D de uma laje com armaduras | 179 |
| Figura 4.20 – Extração de quantidades de aço em Lajes – Dynamo/MS-Excel | 179 |
| Figura 4.21 – Linhas de variação de custo por metro cúbico de betão em função da sua classe | 181 |
| Figura I.1 – Comparação de solução de armaduras para o pilar P3 | 207 |
| Figura I.2 – Imagens representativas do modelo de cálculo simplificado..... | 210 |
| Figura I.3 – Modelos 3D de armaduras – Visão global do edifício administrativo | 211 |
| Figura I.4 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S1 – 200 x 200 x 100 cm ³ | 212 |
| Figura I.5 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S2 – 150 x 150 x 80 cm ³ | 212 |
| Figura I.6 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S3 – 150 x 180 x 85 cm ³ | 212 |
| Figura I.7 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S4 – 290 x 275 x 100 cm ³ | 213 |
| Figura I.8 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S5 – 515 x 495 x 70 cm ³ | 213 |
| Figura I.9 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S6 – 260 x 305 x 85 cm ³ | 213 |
| Figura I.10 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S9 – 270 x 180 x 85 cm ³ | 213 |
| Figura I.11 – Modelos 3D de armaduras – Pilares | 214 |
| Figura I.12 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE1 – 30 x 50 cm ² | 215 |
| Figura I.13 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE3 – 30 x 65 cm ² | 215 |
| Figura I.14 – Modelos 3D de armaduras – Viga V1 – 20 x 60 cm ² | 215 |
| Figura I.15 – Modelos 3D de armaduras – Viga V2 – 30 x 50 cm ² | 216 |
| Figura I.16 – Modelos 3D de armaduras – Viga V3 – 20 x 145 cm ² | 216 |
| Figura I.17 – Modelos 3D de armaduras – Viga V3 – 20 x 125 cm ² | 216 |
| Figura I.18 – Modelos 3D de armaduras – Caixa de Elevadores do edifício administrativo | 217 |
| Figura I.19 – Modelos 3D de armaduras – Paredes da caixa de escadas do edifício administrativo | 218 |
| Figura I.20 – Modelos 3D de armaduras – Escadas do edifício administrativo | 219 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura I.21 – Modelos 3D de armaduras – Laje do rés-do-chão do edifício administrativo | 220 |
| Figura I.22 – Modelos 3D de armaduras – Laje do 1º piso do edifício administrativo | 221 |
| Figura I.23 – Modelos 3D de armaduras – Laje de cobertura do edifício administrativo | 222 |
| Figura I.24 – Modelos 3D de armaduras – Acesso ao Anfiteatro | 223 |
| Figura I.25 – Modelos 3D de armaduras – Visão global do espaço de conferências | 224 |
| Figura I.26 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S7 – 310 x Var. x 90 cm ³ | 225 |
| Figura I.27 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE2 – 40 x 90 cm ² | 225 |
| Figura I.28 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S8 – 570 x 465 x 90 cm ³ | 225 |
| Figura I.29 – Modelos 3D de armaduras – Paredes suporte do centro de conferências | 226 |
| Figura I.30 – Modelos 3D de armaduras – Paredes de suporte à cobertura do centro de conferências | 227 |
| Figura I.31 – Modelos 3D de armaduras – Paredes do acesso exterior do centro de conferências | 228 |
| Figura I.32 – Modelos 3D de armaduras – Lajes do acesso exterior do centro de conferências | 229 |
| Figura I.33 – Modelos 3D de armaduras – Laje de piso interior do centro de conferências | 230 |
| Figura I.34 – Modelos 3D de armaduras – Laje de cobertura do centro de conferências | 231 |
| Figura I.35 – Modelos 3D de armaduras – Lajes inclinadas do centro de conferências | 231 |
| Figura I.36 – Modelos 3D de armaduras – Lajes interiores do centro de conferências | 232 |
| Figura II.1 – Identificação do tipo de laje em planta | 251 |
| Figura II.2 – Identificação do tipo de viga em planta | 252 |
| Figura II.3 – Identificação do tipo de pilar em planta | 252 |
| Figura II.4 – Modelo de cálculo final | 253 |
| Figura II.5 – Nova distribuição de secções de pilares de betão armado | 253 |
| Figura II.6 – Ilustração representativa de problemas em Dynamo | 255 |
| Figura II.7 – Modelação de armaduras pelo Dynamo | 255 |
| Figura II.8 – Representações em planta e 3D das armaduras em Revit | 256 |
| Figura II.9 – Vista em planta dos modelos de armaduras em vigas | 258 |
| Figura II.10 – Visualização parcial dos modelos de armaduras aplicados num dos pisos | 259 |
| Figura II.11 – Vista 3D de todos os modelos de armaduras de vigas | 259 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura II.12 – Vista parcial dos modelos de armadura em pilares..... | 261 |
| Figura II.13 – Vista 3D de todos os modelos de armaduras em pilares | 261 |
| Figura II.14 – Vistas parciais do modelo estrutural com todos os elementos de armadura..... | 262 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 – Classificação LOMD (LOD) convencionada | 13 |
| Tabela 2.2 – Recobrimentos mínimos e nominais para períodos de vida útil de 50 e 100 anos (Quadro NA.II do EC2) | 24 |
| Tabela 2.3 – Diâmetro do mandril a fim de não danificar a armadura, varões e fios (Quadro 8.1N a) do EC2) | 28 |
| Tabela 2.4 – Controlo de fendilhação (Quadro 7.2N e 7.3N do EC2)..... | 29 |
| Tabela 3.1 – Resultados de armadura longitudinal necessária (viga MEF) | 79 |
| Tabela 3.2 – Resultados de armadura transversal necessária (viga MEF) | 79 |
| Tabela 3.3 – Resultados de armadura longitudinal necessária (viga EFB) | 80 |
| Tabela 3.4 – Resultados de armadura transversal necessária (viga EFB)..... | 80 |
| Tabela 3.5 - Resultados de armaduras longitudinais e transversais necessárias (Pilar MEF e Pilar EFB) .. | 81 |
| Tabela 3.6 – Resultados de armaduras longitudinais em painéis | 82 |
| Tabela 3.7 – Apresentação parcial da base de dados de materiais | 145 |
| Tabela 3.8 – Tabelas de coeficientes de pressão exterior segundo o EC1-4..... | 146 |
| Tabela 3.9 – Rotinas básicas criadas em VBA para cálculo de cargas associadas a paredes exteriores .. | 146 |
| Tabela 3.10 – Exposição parcial do código para importação de dados de painéis (Rafa Gaweda) | 149 |
| Tabela 3.11 – Exemplos parciais de código VBA para dimensionamento de lajes | 150 |
| Tabela 4.1 – Tabela de preços para o aço da página orçamentos.eu | 180 |
| Tabela 4.2 – Tabela para definição do custo final do metro cúbico de betão | 181 |
| Tabela 4.3 – Resultados de quantificação e orçamentação para o caso de estudo 1 | 182 |
| Tabela I.1 – Composição por camadas – Alvenaria Tipo 1 | 195 |
| Tabela I.2 – Composição por camadas – Divisórias..... | 196 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela I.3 – Composição por camadas – Escadas..... | 196 |
| Tabela I.4 – Composição por camadas – Piso Intermédio..... | 196 |
| Tabela I.5 – Composição por camadas – Cobertura..... | 197 |
| Tabela I.6 – Composição por camadas – Varandas | 197 |
| Tabela I.7 – Composição por camadas – Palas..... | 197 |
| Tabela I.8 – Sobrecargas de utilização por zona de aplicação | 198 |
| Tabela I.9 – Dados e resultados para determinação da pressão dinâmica de pico | 198 |
| Tabela I.10 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão nas fachadas..... | 199 |
| Tabela I.11 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais | 199 |
| Tabela I.12 – Pressão exercida pelo vento sobre as fachadas | 199 |
| Tabela I.13 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão na cobertura..... | 199 |
| Tabela I.14 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais | 200 |
| Tabela I.15 – Pressão exercida pelo vento sobre a cobertura | 200 |
| Tabela I.16 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão nas fachadas..... | 200 |
| Tabela I.17 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais | 200 |
| Tabela I.18 – Pressão exercida pelo vento sobre as fachadas | 201 |
| Tabela I.19 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão na cobertura..... | 201 |
| Tabela I.20 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais | 201 |
| Tabela I.21 – Pressão exercida pelo vento sobre a cobertura | 201 |
| Tabela I.22 – Casos de carga aplicados..... | 202 |
| Tabela I.23 – Combinações ULS..... | 202 |
| Tabela I.24 – Combinações SLS e RSA | 203 |
| Tabela I.25 – Relação entre armaduras longitudinais | 204 |
| Tabela I.26 - Soluções de Armadura Longitudinal | 204 |
| Tabela I.27 – Relação entre armaduras transversais..... | 205 |
| Tabela I.28 – Relação entre armaduras longitudinais | 206 |
| Tabela I.29 – Relação entre armaduras transversais..... | 206 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela I.30 – Verificação de segurança à flexão em lajes | 208 |
| Tabela I.31 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Sapatas..... | 233 |
| Tabela I.32 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Pilares..... | 234 |
| Tabela I.33 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Vigas..... | 234 |
| Tabela I.34 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Paredes | 235 |
| Tabela I.35 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Escadas..... | 235 |
| Tabela I.36 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Lajes | 236 |
| Tabela I.37 – Quantificação de betão e cofragem – Totais..... | 237 |
| Tabela I.38 – Quantificação de aço – Sapatas..... | 237 |
| Tabela I.39 – Quantificação de aço – Pilares..... | 238 |
| Tabela I.40 – Quantificação de aço – Vigas | 238 |
| Tabela I.41 – Quantificação de aço – Paredes..... | 238 |
| Tabela I.42 – Quantificação de aço – Escadas..... | 239 |
| Tabela I.43 – Quantificação de aço – Lajes – A400 | 239 |
| Tabela I.44 – Quantificação de aço – Lajes – A500 | 239 |
| Tabela I.45 – Quantificação de aço – Total | 240 |
| Tabela II.1 – Valores simplificados para cálculo da pressão dinâmica de pico | 245 |
| Tabela II.2 – Pressão Superficial Exterior (w_e) na cobertura em terraço | 246 |
| Tabela II.3 – – Pressão Superficial Exterior (w_e) na Fachada XZ..... | 246 |
| Tabela II.4 – Pressão Superficial Exterior (w_e) na Fachada YZ..... | 246 |
| Tabela II.5 – Pressão exercida pela neve em Castelo Branco..... | 247 |
| Tabela II.6 – Pesos Específicos dos materiais..... | 247 |
| Tabela II.7 – Valores utilizados na contabilização das cargas permanentes..... | 248 |
| Tabela II.8 – Valores regulamentares do coeficiente de redução de sobrecarga | 248 |
| Tabela II.9 – Dados Sísmicos e localização de Castelo Branco | 249 |
| Tabela II.10 – Soluções de armadura em lajes | 254 |
| Tabela II.11 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes..... | 254 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela II.12 – Orçamentação..... | 254 |
| Tabela II.13 – Soluções de armadura aplicadas..... | 257 |
| Tabela II.14 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes..... | 257 |
| Tabela II.15 – Orçamentação..... | 258 |
| Tabela II.16 – Soluções de armadura aplicadas..... | 260 |
| Tabela II.17 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes..... | 260 |
| Tabela II.18 – Orçamentação..... | 260 |
| Tabela II.19 – Orçamentação Global | 262 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A introdução do BIM no mundo atual da construção civil e em todos os processos inerentes à prática de engenharia e todas as demais atividades do ramo da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) veio revolucionar o modo como toda a estrutura organizacional e metodologia de trabalho é aplicada.

Desde a conceção à exploração de um empreendimento, a metodologia BIM vem para apoiar e agilizar o sistema de gestão de informação e execução de obra.

Esta metodologia funciona a partir do compromisso das mais diversas marcas de *software* na criação de aplicativos interoperáveis e com capacidades de reunir e distribuir a informação de projeto por todos os intervenientes da construção.

Em Portugal a disseminação deste método começa a ganhar contornos de grande relevância para a área da Arquitetura Engenharia e Construção (AEC) e presume-se que ganhe um contexto de peso num futuro próximo, seguindo as pisadas dos nossos vizinhos Europeus e dos demais exemplos de sucesso mundial.

A base do BIM é a criação de um modelo tridimensional do empreendimento e apesar de as ferramentas de modelação estrutural e arquitetónica já serem recorrentes na área da conceção e projeto, só mais recentemente é que se criou uma forma de diferentes gabinetes reunirem todas as informações relevantes e a compartilharem sem algo ser perdido na tradução feita entre os diversos aplicativos.

Por essa razão, atividades que antes se pensariam desnecessárias ou demasiado complexas de idealizar numa fase de projeto são hoje exequíveis e trazem vantagens em termos de redução de custos e tempo e aumento da qualidade de projeto, permitindo a antevisão de todos os processos a executar, a sua otimização e gestão.

A modelação de modelos de armaduras é uma dessas atividades, permitindo a visão das soluções e da viabilidade das mesmas antes da sua execução em obra, facilitando a produção de desenhos técnicos, da medição de quantidades e a respetiva orçamentação e ainda otimizando a execução da obra com a possibilidade de integrar estes modelos num planeamento de obra que tenha em conta um modelo representativo da montagem de armaduras em função de um intervalo temporal, dando indicações dos passos a seguir e do calendário de execução da montagem.

Nesta dissertação o foco vai ser a modelação de armaduras BIM em elementos de betão armado, demonstrando algumas das vantagens em termos de conceção numa fase de análise estrutural e para a fase de pós modelação com a produção de desenhos técnicos, as medições e orçamentações finais.

São abordados programas de modelação, análise e pormenorização com uma forte incidência sobre a área da modelação de armaduras e que dão à fase de projeto ferramentas que prometem agilizar o processo geral de conceção e de produção de documentos. Além disso é facultado pelos programas em estudo a possibilidade de o utilizador desenvolver as suas próprias ferramentas e/ou recorrer à interoperabilidade promovida entre os diversos aplicativos, personalizando o fluxo de trabalho e garantindo uma ideologia BIM aos projetos.

1.2 METODOLOGIAS E OBJETIVOS

A presente dissertação foi desenvolvida em ambiente de estágio curricular no gabinete da empresa NEWTON – Consultores de Engenharia e o tema abordado é a automatização do processo de modelação de armaduras em elementos de betão armado. Neste âmbito exploraram-se as capacidades atuais de alguns programas de modelação e cálculo estrutural como base do objetivo final de desenvolvimento de ferramentas para automatização da modelação de armaduras.

Seguiram-se duas abordagens para a realização do tema:

- A primeira teve por base a aplicação das ferramentas atuais para a modelação e produção de dados relevantes para um caso de estudo de uma estrutura existente, apresentando dados sobre uma verificação da segurança estrutural da mesma e uma visualização dos componentes estruturais numa perspetiva tridimensional.
- A segunda abordagem centrou-se na criação de ferramentas próprias de dimensionamento e modelação de armaduras que são de seguida aplicadas a um caso de estudo académico de um edifício, com o seu modelo de cálculo previamente desenvolvido.

Para ambas as abordagens foi necessário criar alguns casos de estudo para teste das ferramentas utilizadas/criadas no decorrer do estágio.

No contexto da estrutura da dissertação, foi desenvolvido um núcleo teórico da aplicação e desenvolvimento das ferramentas com uma análise sobre os resultados obtidos com os casos de estudo de teste, ficando o espaço dedicado para o desenvolvimento dos dois principais casos de estudo disposto em anexo.

1.3 INSTALAÇÃO DE ACOLHIMENTO

A Newton é um gabinete com vasta experiência em consultoria e elaboração de projetos nas mais variadas especialidades de engenharia civil. Com presença relevante no mercado e um amplo envolvimento em diversos projetos de renome nacional e internacional, um excelente exemplo é a participação no projeto do terminal de cruzeiros de Leixões.

A equipa da Newton é composta por colaboradores com excelentes credenciais técnicas e experiência de trabalho, preparada para responder a qualquer desafio que lhes seja proposto. Desde a sua conceção que o gabinete procura criar um bom ambiente e um local de trabalho que promova a excelência e a qualidade do trabalho desenvolvido, dando espaço para o desenvolvimento pessoal e para a criatividade. A título de exemplo fica o *software* PAC-Pórticos, desenvolvido em 1991, um ano após a criação da marca Newton, e que permitiu à empresa ganhar um lugar de destaque no desenvolvimento e conceção de projetos. Atualmente este aplicativo já não é utilizado em grande escala, mas a empresa possui novas ferramentas próprias de cálculo estrutural adaptadas para o apoio aos programas de análise mais recentes.

Os projetos atuais da Newton estão mais relacionados com a elaboração de projetos de estruturas do tipo industrial e reabilitação, mas encontram espaço para realizar, em conjunto com a BIMMS – *Building Information Modeling Management Solutions*, a integração das diversas especialidades envolvidas no empreendimento de um hotel de luxo internacional, entre outras parcerias, das quais o próprio Instituto Superior de Engenharia do Porto faz parte, ao permitir a colaboração de jovens estudantes no seu dia a dia e a proporcionar-lhes uma experiência de trabalho única.

No mesmo edifício onde a Newton está instalada existem outros dois gabinetes, o da Elemento Finito e o da BIMMS. Este convívio empresarial amplifica o fenómeno de partilha de conhecimento e aprofunda o envolvimento dos estudantes em estágio ao conceder-lhes uma perspetiva alargada do funcionamento dos diferentes gabinetes e um desenvolvimento de habilidades noutros campos científicos da área de engenharia civil.



Figura 1.1 – Logótipos da empresa de acolhimento e dos restantes gabinetes

1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

No primeiro capítulo é dado o enquadramento, assim como o objetivo e as metodologias utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação. É ainda feita uma apresentação do gabinete de acolhimento, da sua história e a da sua atual atividade. É feita uma descrição da estrutura global do relatório.

No segundo capítulo é apresentado o atual estado do tema. Inicia-se pela apresentação do que é a metodologia BIM, com um resumo das principais características e conceitos, prosseguindo para o patamar atual da regulamentação estrutural, com uma visão sobre as principais disposições construtivas e alguns dos aplicativos de dimensionamento estrutural, com uma descrição geral das suas capacidades. A finalizar o capítulo está a modelação enquanto tópico e base de interoperabilidade, apresentando algum do *software* atual e os principais formatos para partilha de dados.

O terceiro capítulo inclui todo o desenvolvimento feito sobre a aplicação de *software*, com as principais funcionalidades e limitações de cada um. A estrutura divide-se pela apresentação do *software* de cálculo Robot Structural Analysis e uma comparação com o programa PAC-Pórticos, servindo esta base de comparação para definição do estado de evolução das ferramentas de cálculo. A segunda parte do capítulo tem a modelação como principal tema, apresentando os programas Revit, Tekla Structures e Advance Concrete como os principais objetos para modelação de armaduras e os demais componentes estruturais. O capítulo termina com a apresentação de duas ferramentas de programação, o MS-Excel e o Dynamo, para criação de instrumentos de cálculo e de modelação personalizados.

O quarto capítulo é uma continuação direta do terceiro, mas o foco incide sobre as ferramentas de cálculo e modelação desenvolvidas, demonstrando os resultados alcançados com o seu desenvolvimento.

O quinto e último capítulo é composto pelas conclusões finais obtidas e pelas expectativas futuras para o desenvolvimento desta área de modelação.

Seguem-se os anexos com o desenvolvimento dos principais casos de estudo, apresentando-se os resultados e conclusões essenciais de cada um.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 BIM

Building Information Modeling, ou BIM de forma simplificada, é uma metodologia que envolve a criação e gestão de um modelo digital com a representação das características físicas e funcionais de um lugar ou edifício. Esses modelos são guardados em ficheiros que permitem a salvaguarda de informação relevante para o desenvolvimento da construção e partilha entre a rede de intervenientes diretamente envolvidos no empreendimento.

O BIM é uma ferramenta que fomenta a agilização do processo de execução de projeto/construção através do suporte à tomada de decisão. A metodologia permite gerar uma otimização do planeamento e aumenta a coordenação entre as diversas especialidades envolvidas, facilitando os processos de alteração para compatibilização de projetos secundários indispensáveis para o desenvolvimento da obra. Essa sincronização e possibilidade de antevisão são duas das grandes vantagens associadas ao sistema processual BIM, reduzindo atrasos e custos associados a erros e omissões de projetos de especialidade e incompatibilidades entre as diversas artes aplicadas.

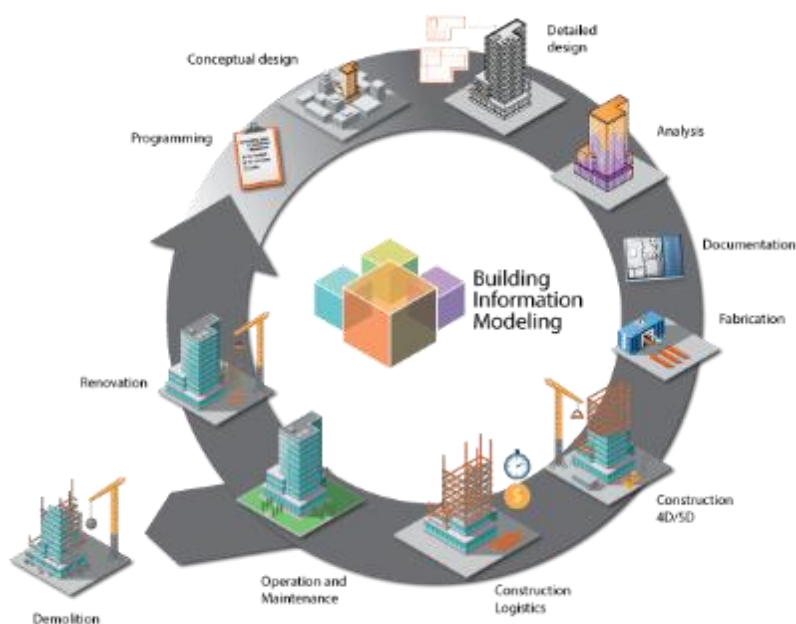


Figura 2.1 – BIM ao longo do ciclo de vida de um edifício (*Lloyd's Register*)

Como se pode perceber pelo esquema da figura 2.1 o BIM é aplicado ao longo de todo o ciclo de vida do edifício. Desde a fase de concepção e planeamento, seguindo pelo projeto e construção, e mantendo-se ativo na fase de exploração. O processo só é finalizado uma vez alcançado o período de fim de vida útil da estrutura e a sua respetiva demolição. É claro, que se a metodologia for aplicada da forma mais vantajosa e forem seguidos os planos de manutenção, reabilitação e eventual reforço das instalações, o período de vida útil do empreendimento pode ser prolongado por tempo praticamente indefinido.

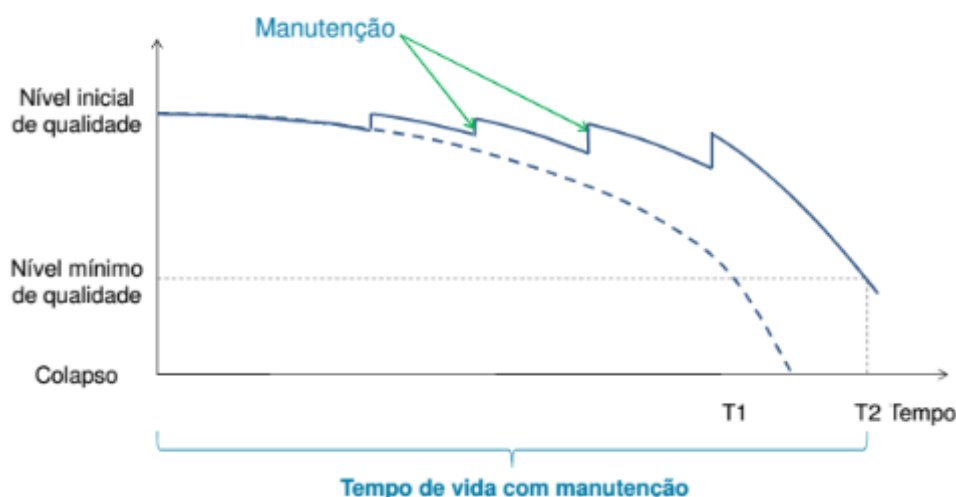


Figura 2.2 – Tempo de vida de um Edifício com manutenção regular (*Carlos Rodrigues*)

Segundo a página *BIMgeneration*, da *Bouygues* [26], é estimado que 75% dos custos de projeto são gerados na fase de exploração das instalações, relativamente ao retorno de investimento. É por isso um dever do(s) gestor(es) implementar um plano de manutenção regular.

É igualmente relevante para a fase de exploração garantir um acompanhamento do edifício relativamente aos consumos energéticos associados e ao estado de conservação de equipamentos, assim como a sustentabilidade e disponibilidade dos mesmos.

O BIM através de ferramentas associadas ao *Facility Management* é, cada vez mais, indispensável para garantir a eficiência e sustentabilidade de novos empreendimentos. É, no entanto, na fase inicial de concepção e projeto que o BIM é capaz de invocar todos os parâmetros de sustentabilidade e eficiência energética, através da possibilidade de criação de projetos focados na adaptabilidade e compatibilização à zona onde o investimento é aplicado.

A metodologia BIM já é amplamente utilizada no Reino Unido e fontes do governo estimam que o uso desta plataforma de coordenação e gestão está associada a um decréscimo de cerca de 20% dos custos de construção de edifícios correntes [26].

Segundo uma apresentação da *VIANOVA* [23], empresa de desenvolvimento de *software* para infraestruturas, as vantagens da aplicação do BIM são já reconhecidas em diversas áreas da engenharia civil, sendo reconhecida a sua utilidade mais recentemente na área de infraestruturas onde as vantagens associadas à redução de alterações *mid project* são evidentes comparando o método de construção tradicional e o método de construção apoiado numa plataforma digital de partilha de dados.

Refere *Hugo Sousa* [17] na sua dissertação que o sector da construção é uma área que sofre de uma estrutura bastante fragmentada em comparação com outras grandes indústrias, afirmando ainda que é devido a essa faceta multiorganizacional e multidisciplinar que este sector mais tem a ganhar com a adoção deste tipo de plataforma de comunicação. Fazendo a união de conceitos tratados em diversas dissertações e artigos existentes, desenvolvendo mais especificamente alguns pontos abordados por *Hugo Sousa* [17] e pela *Bouygues* [26], ficam de seguida listadas as principais vantagens associadas à implementação de BIM nas diferentes fases de um empreendimento.

I. Conceção

- i. Visualização de um modelo do futuro empreendimento aproximado por realidade virtual à versão real/final do projeto (melhor perceção por parte dos *stakeholders* do que será feito durante a obra e qual o resultado final);
- ii. Custos de projeto otimizados (Análise de Risco mais fiável, quantificação inicial de recursos facilitada);
- iii. Uma única base de dados (coerência na informação disponibilizada);
- iv. Otimização de planeamento e coordenação (definição de metas, gestão mais eficiente);
- v. Antecipação de desafios (resolução de potenciais problemas, determinação de medidas preventivas).

II. Projeto

- i. Sintetização de dados (ligação entre especialidades num só modelo, redução de repetições e incoerências)
- ii. Simulação de funcionamento/execução (estudos de sustentabilidade, eficiência energética, visualização virtual do processo de execução e/ou faseamento da obra)
- iii. Identificação de características, materiais, equipamentos e demais configurações estruturais e arquiteturais (Quantificação e orçamentação exata)
- iv. Facilidade na criação de elementos 2D a partir do modelo 3D (produção de desenhos e esquemas com peças ou pormenores de montagem)

- v. Realização de alterações e compatibilização entre especialidades antes da fase de execução da obra (redução de custos e atrasos associados a ajustes de projetos)

III. Construção

- i. Visualização de faseamentos construtivos e/ou de pormenores de execução complexa (Maior percepção de qual o melhor método de abordagem à obra, prevenção de erros de execução/montagem de elementos em obra)
- ii. Logística otimizada (planeamento e gestão de estaleiro, da obra e das equipas em obra, necessidades de abastecimento, gestão de armazém)
- iii. Cumprimento de prazos (evitam-se atrasos na obra por falta de material em stock, erros de projeto e/ou erros de execução)
- iv. Segurança (através da identificação de riscos e prevenção dos mesmos)
- v. Melhor qualidade do projeto/obra (facilita a correção ou evita falhas/problemas em obra)

IV. Exploração

- i. Melhora a utilização e a manutenção (informação rigorosa sobre os recursos disponíveis)
- ii. Reforço da documentação técnica (o modelo é um manual de utilização, facilidade na produção de documentos para clarificação de utilização de equipamentos instalados)
- iii. Marketing facilitado (material para promoção do empreendimento mais atrativo e diversificado, com potencial para demonstrar ao cliente como serão as instalações já com as suas exigências e intenções de uso simuladas virtualmente)

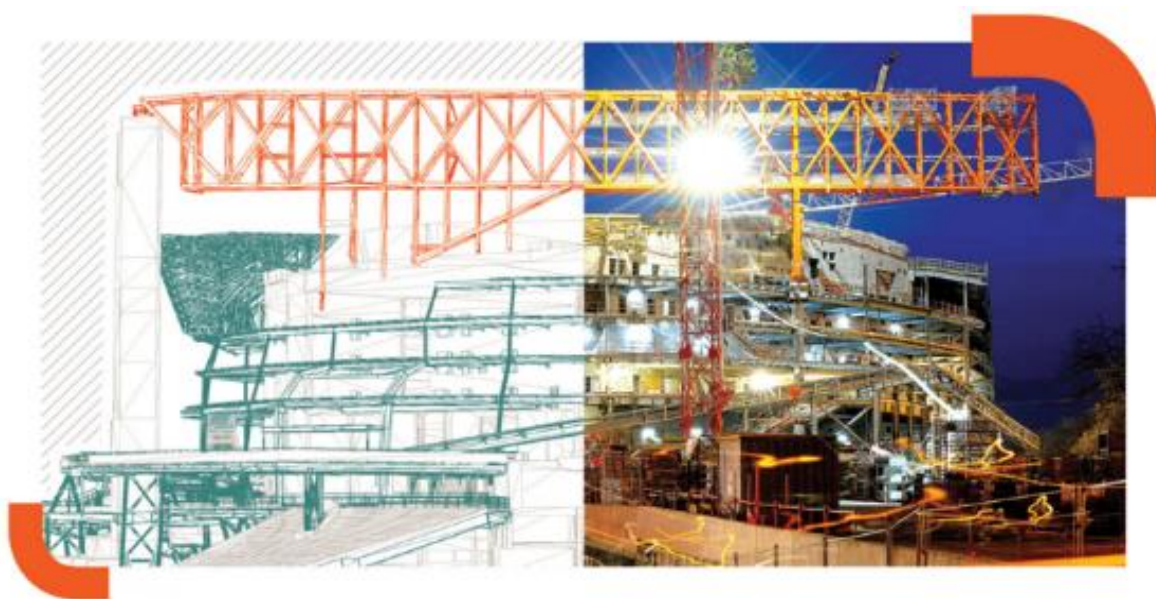


Figura 2.3 – Imagem representativa da passagem do papel para a realidade (*Bouygues*)

2.1.1 Conceitos Básicos

A entrar de forma mais aprofundada nesta metodologia de gestão e coordenação de empreendimentos temos de analisar alguns dos conceitos mais básicos associados ao BIM.

O primeiro desses conceitos passa pelo nível de BIM ligado ao projeto. O nível de BIM é um conceito criado/utlizado como referência ao estilo de projeto BIM, a nomenclatura seguidamente abordada é mais utilizada no Reino Unido, sendo nos restantes membros europeus apenas um conceito de referência que pode ou não vir a ser adaptado. Seguindo as referências da *Bouygues* [26], da *3D Perspectives* [27], assim como de algumas dissertações, conseguimos classificar os níveis BIM da seguinte forma:

- **Level 0 – Computer Assisted Design (CAD)**
 - Uso exclusivo de ferramentas CAD para criação de elementos representativos das diversas especialidades em papel. Ainda é comum o recurso a este tipo de metodologia para entrega de elementos de pormenor em obra. Claro que hoje em dia o recurso a ferramentas CAD já não é feito de forma isolada, servindo este tipo de ferramenta como um *software* de apoio ao modelo 3D e os elementos em papel como elementos de apoio à obra.
- **Level 1 – Modelos 3D isolados**
 - Este nível é já bastante utilizado, uma vez que já é prática corrente na indústria recorrer a *software* de modelação com capacidades de pormenorização, simulação e análise no decorrer de projetos. O que este nível indica é que cada interveniente, o arquiteto, a equipa de engenharia, fornecedores, geram o seu próprio modelo BIM para responder às suas necessidades de execução de projeto.
- **Level 2 – BIM colaborativo**
 - Este nível de BIM já se refere ao princípio básico da sua aplicação e que envolve a colaboração de todos os intervenientes sobre um único modelo 3D BIM. A gestão do modelo é feita por um BIM *manager* que tem como objetivo a compilação e sintetização da informação através de relatórios dedicados a reportar conflitos na interface dos diferentes modelos de especialidade.
- **Level 3 – BIM integrado**
 - Este é o objetivo atual da implementação do BIM. O objetivo deste nível é ser capaz de permitir a entrada de dados individuais de cada interveniente em tempo real num único modelo BIM. Este objetivo ainda não foi implementado na totalidade devido a algumas limitações e incompatibilidades existentes entre *software* BIM. Algo que se conta que seja minimizado, se não eliminado, com a evolução dos sistemas informáticos e das capacidades operativas de algumas das ferramentas BIM já existentes. Ainda assim este tipo de aplicação do BIM já é

utilizado, com mais ou menos limitações, em situação de gestão do ciclo de vida de um empreendimento.

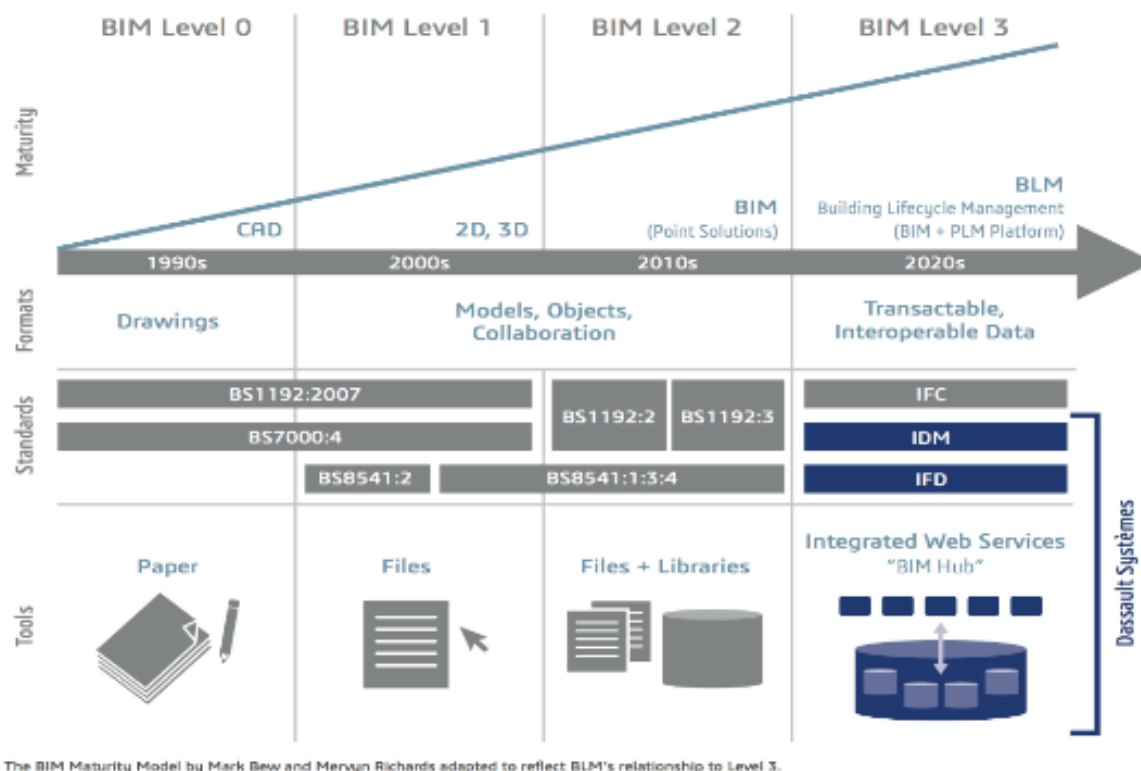


Figura 2.4 – Esquema de níveis de aplicação BIM (3D Perspectives)

Outro conceito básico ainda relacionado com nível de BIM esquematizado na figura 2.4 é o conceito de BIM nD. O *n* inserido no título do conceito refere-se à noção de dimensão do modelo BIM e do tipo de informação que esse modelo está apto a disponibilizar.

O número de dimensões disponíveis, até ao presente, são oito e estas apenas têm início no patamar das duas dimensões. Nada indica que o número de dimensões se fique pelas oito, com o evoluir da metodologia e o encontro de novas oportunidades de otimização de processos no decorrer do ciclo de vida de um empreendimento, novas dimensões poderão surgir e criar novas formas de abordar um projeto. A descrição segundo a *Objectif BIM* [28], página de *Patrick Riedo*, Engenheiro Civil na Suíça, e segundo outras fontes, de cada uma das atuais dimensões é a seguinte:

- **BIM 2D** – Dimensão associada aos desenhos CAD 2D, com plantas e especificações técnicas associadas. Ainda amplamente utilizada em obra. Hoje em dia, criados recorrendo ao modelo tridimensional.
- **BIM 3D** – Associado à parte de visualização e coordenação do projeto antes do início dos projetos, assim como na identificação de conflitos de *design* numa fase de pré-construção. Insere no projeto modelos tridimensionais com características acerca da sua constituição disponíveis para

consulta e visualização mais detalhada. Apresentam informações relativas à geometria e às propriedades físicas das diversas peças.

- **BIM 4D** – Adiciona o parâmetro “tempo” às três dimensões previamente estabelecidas. Cria a possibilidade de vincular um parâmetro geométrico a um cronograma de construção. Esta característica permite criar um modelo virtual do faseamento construtivo.
- **BIM 5D** – Acrescenta os custos às restantes dimensões já implementadas no modelo. Esta dimensão representa a estimativa orçamental associada ao empreendimento. É uma dimensão que dá a possibilidade de fazer uma avaliação financeira ao investimento que está a ser feito.
- **BIM 6D** – Ligado ao conceito de sustentabilidade, com a análise de eficiência energética e análise da propriedade.
- **BIM 7D** – Dimensão relacionada com os parâmetros de gestão do empreendimento ao longo do seu ciclo de vida, *Facility Management* (FM). Inclui a exploração e manutenção da estrutura.
- **BIM 8D** – Esta última dimensão ainda não é consensual. Alguns críticos indicam esta oitava dimensão como sendo a integração de todas as dimensões anteriores, algo que parece desligado da evolução do conceito de dimensão uma vez que não adiciona nada de novo às sete dimensões já estabelecidas. A outra versão de 8D refere esta oitava dimensão como sendo a ligação do modelo às políticas de prevenção de riscos associados a acidentes de trabalho. Ou seja, este 8D insere a dimensão de segurança e saúde no trabalho (SST) [49].

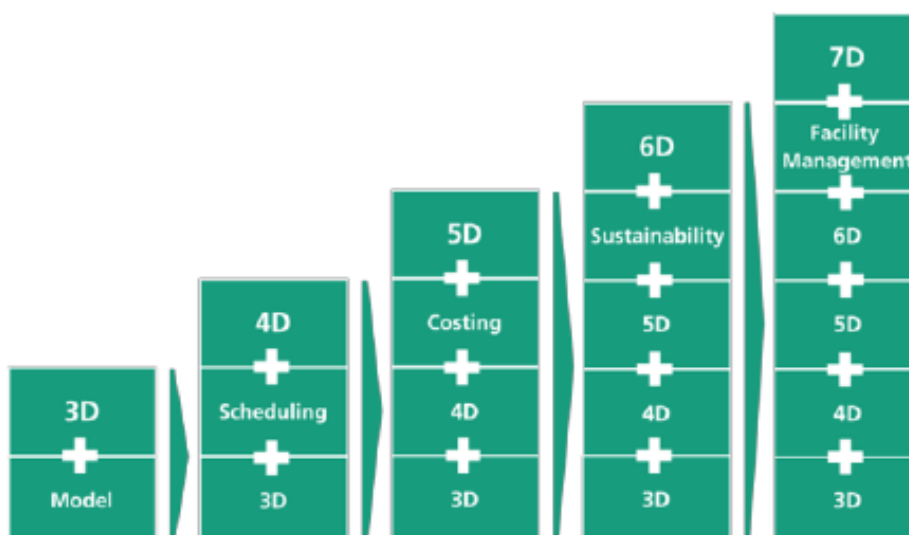


Figura 2.5 – Esquema com dimensões BIM mais utilizadas atualmente

O último conceito, aquele que talvez seja o mais relevante em termos de definição de alcance dos objetivos estabelecidos no embarque para o desenvolvimento do tema deste relatório de estágio, é o *Level of Development* ou LOD na sua convenção americana, *Level of (Model) Definition* ou LOMD na convenção britânica.

Não confundir *Level of Development* com *Level of Detail*. Os dois até podem estar relacionados, mas o nível de detalhe foca-se no desenvolvimento da resolução e pormenorização de um dado objeto sem contabilizar a informação externa relativa à composição física, aos custos e a todo um conjunto de informações relevantes para o processo de aquisição e aplicação em obra.

A convenção britânica para a definição de *Level of Detail* vai do G0 até ao G3, onde o primeiro nível se refere a uma representação simbólica do elemento e este vai evoluindo até à última marcação, onde o elemento tridimensional já se encontra totalmente detalhado e em alta resolução. Estes níveis de detalhe são usados primariamente para visualização, mas podem também ser usados como elementos para produção de peças reais. A imagem seguinte permite compreender melhor este conceito.

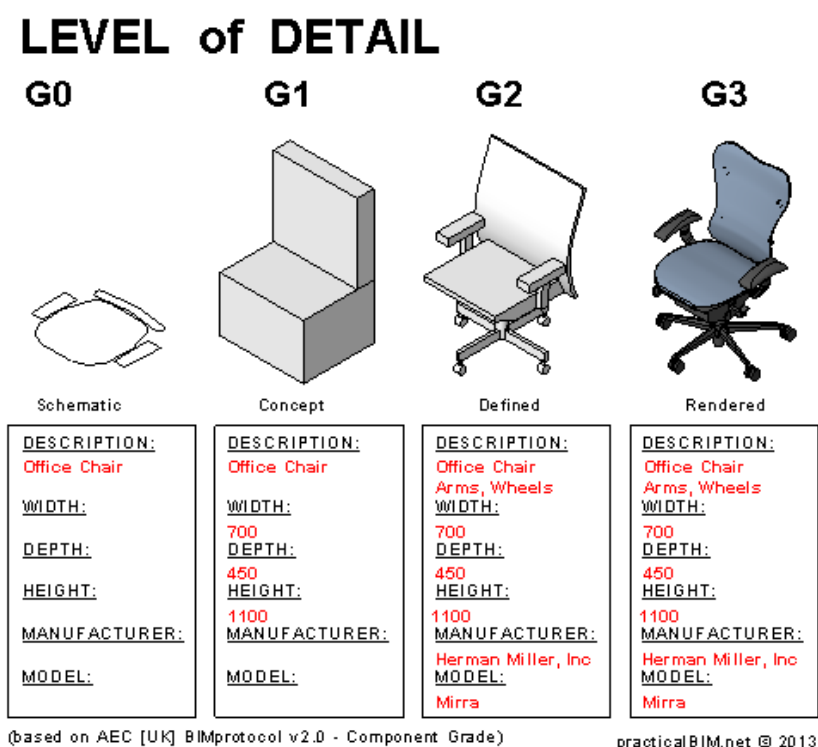


Figura 2.6 – Exemplo de evolução do *Level of Detail* num objeto (*practical BIM*)

Segundo a *evolveconsultancy* [30], uma empresa britânica de consultoria BIM, a definição britânica de LOD acaba por ser uma correção à definição americana uma vez que a definição de nível de desenvolvimento surge através da junção de duas outras definições, o *Level of Detail* (LOD) e o *Level of Information* (LOI). A ser feita a representação por siglas destas três definições obteríamos:

$$LOD = LOD + LOI \rightarrow LOI = 0 ?$$

Daí a “necessidade” da convenção britânica assumir um acrónimo diferente. A representação acaba por fazer mais sentido e fica expressa da seguinte forma.

$$LOMD = LOD + LOI$$

Em relação à marcação LOMD a convenção britânica acaba por surgir como ligeiramente mais extensa na definição de categoria de desenvolvimento de um elemento/empreendimento comparativamente com o seu congénere americano. A tabela 2.1 resulta do cruzamento de informação da *evolveconsultancy* [30] com informações de outras fontes, artigos e dissertações analisadas, e define cada nível de desenvolvimento.

Tabela 2.1 – Classificação LOMD (LOD) convencionada

| LOMD (UK) | LOD (US) | Descrição |
|-----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LOMD 1 | _____ | Informativo – Um modelo para comunicação dos requisitos de desempenho e restrições locais. Os modelos de construção são apenas blocos representativos. |
| LOMD 2 | LOD 100 | Conceptual – Modelo conceptual ou de massa, destina-se a estudos de análise da construção, inclui áreas básicas, volumes, orientação e custo. É utilizado, por exemplo, no estudo de uma instalação de sistemas AVAC. Pode incluir modelos de blocos nos locais de implementação de condutas de distribuição. |
| LOMD 3 | LOD 200 | Design – Modelo para desenvolvimento de <i>design</i> . Engloba sistemas generalizados com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação. Exemplo em sistemas AVAC: Condutas modeladas através de um percurso de instalação aproximado ao que é expectável no final, representação da dimensão máxima possível das condutas, sem pormenorização de ligações ou raios precisos de curvas. Mais em conta com aquilo que é esperado pelo arquiteto. |
| LOMD 4 | LOD 300 | Produção, ou pré -construção – Modelo com "Intenção de <i>design</i> ", representa o fim da fase de conceção. Elementos modelados de forma precisa e coordenada, adequados para uma estimativa de custos e controlos de conformidade regulamentares. Este LOD normalmente é utilizado para a produção de documentos de construção tradicionais e desenhos técnicos. Modelo esperado pelo engenheiro de estruturas, com tamanhos e localizações precisas das condutas. Permite ter noção das necessidades de execução de negativos em elementos de suporte estrutural e dimensionar em função dessas restrições. |

| | | |
|--------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| _____ | LOD 350 | Proposta – Elemento representado graficamente no modelo com detalhe suficiente para coordenar a ligação entre interfaces e especificar o <i>layout</i> de construção. Contém todos os dados previamente inseridos no LOD 300. Em comparação com o LOD anterior este acrescenta mais detalhe à interação/ligação elemento-elemento no modelo. |
| LOMD 5 | LOD 400 | Instalação – Modelo apurado com requisitos de construção e componentes de construção específicas, incluindo geometria e dados de elementos modelados em subcontratação. Modelo adequado para o fabrico e montagem de peças. Para um sistema de climatização esta será a fase onde são especificados os comprimentos de corte, elementos de fixação em modelos CAM (Computer-Aided Manufacturing). |
| LOMD 6 | LOD 500 | “As built” – Um modelo “as built” representativo de como se encontra construído o elemento final. Os dados associados ao modelo são adequados para manutenção e operação das instalações. |
| LOMD 7 | _____ | Management Data – Informação sobre recursos do modelo usados para as operações de manutenção e monitorização de desempenho. |

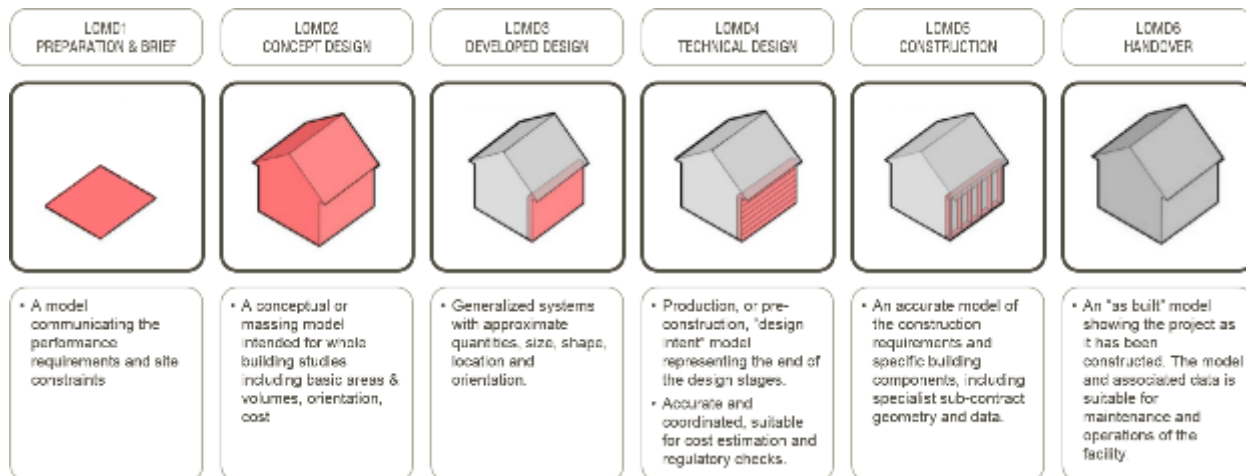


Figura 2.7 – Exemplo de evolução do LOMD aplicado a um empreendimento (*evolveconsultancy*)

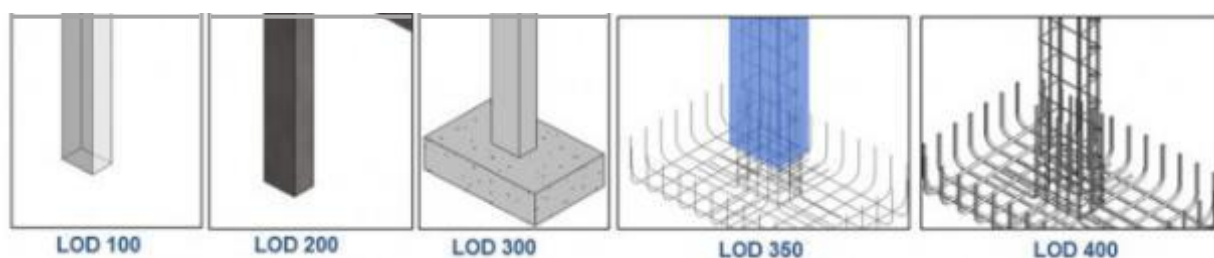


Figura 2.8 – Exemplo de aplicação do LOD a um elemento de betão armado (Óscar Liébana)

A representação da figura 2.8 é a que mais se afigura ao que é proposto alcançar com o desenvolvimento deste relatório.

A aplicação deste LOD/LOD é feita recorrendo às capacidades dos diversos programas de modelação paramétrica BIM existentes. A vantagem destes programas, além de possibilitarem a criação de um modelo com geometria parametrizada, relacionamento entre elementos paramétricos e reconhecimento do posicionamento espacial, é possuírem bibliotecas de materiais e terem ou permitirem a importação/edição de informação relativa a propriedades físicas, como o tipo de material, a massa ou comportamento térmico/acústico, assim como informações relativas a custos e fabricante.

2.1.2 Interoperabilidade

A definição conceptual de interoperabilidade é dada como a habilidade de proceder à troca/partilha de dados entre *software* e/ou computadores sem perda de conteúdo e informação.

A interoperabilidade não é um conceito BIM mas sim uma parte intrínseca do processo colaborativo preconizado pela metodologia. A não existência desta característica fundamental do processo significaria a impossibilidade ou impraticabilidade de todo o sistema de coordenação e gestão de projeto no qual o BIM se apoia. Isto significaria que a diferença entre o método tradicional de execução de um empreendimento e o método BIM em pouco ou nada difeririam um do outro.

A realidade da interoperabilidade em BIM é alcançada através do compromisso de diversas entidades empresariais no desenvolvimento de plataformas que permitem a conversão de dados para um modelo global de ficheiros facilmente visualizáveis pelos vários intervenientes do projeto.

Alguns países, como os Estados Unidos, a Finlândia e a Noruega, já possuem documentação padrão de aplicação de interoperabilidade em empresas de destaque no sector público imobiliário como a *General Services Administration* (US) e as Propriedades do Senado da Finlândia. Informação recolhida do artigo redigido por Geoff Zeiss, autor do *software* geoespacial, no seu blog *Between the Poles* [33] e da página *Construction21* [32].

Usando a informação da *AIKnowledgeNet* [34], página do *American Institute of Architecture*, entre outras fontes, são indicadas como vantagens reconhecidas da aplicação da interoperabilidade:

- I. O uso de quaisquer ferramentas de mercado aberto que melhor se adequem às necessidades de projeto;
- II. A facilidade na troca de dados em todo o ciclo de vida do projeto;
- III. A criação de um *portfolio* de dados padronizados de forma consistente;
- IV. A promoção de concorrência entre os fornecedores de *software* para produzir os melhores produtos possíveis;
- V. A maximização da abertura e competitividade do mercado de serviços de *design*;
- VI. A garantia de que os dados do projeto permanecem úteis no futuro, independentemente das políticas e decisões de negócios de fornecedores individuais.



Figura 2.9 – Interoperabilidade como uma ponte de comunicação (*echotech*)

Nesta era de partilha de informação digital, o conceito de interoperabilidade BIM é baseado na partilha de ficheiros em rede. Esta partilha de dados é feita através de formatos de ficheiro criados especificamente para garantir que o cruzamento de informação entre as diversas ferramentas BIM se efetua sem perda de informação na mudança de formatos de um ficheiro.

O formato que é mais usualmente referido sempre que se fala de interoperabilidade por meio *online* de partilha de dados, relativos à modelação de edifícios e estruturas, é o IFC, *Industry Foundation Classes*. Este é o formato de ficheiro desenvolvido pela *BuildingSMART* e que serve de protocolo padrão de normalização para a partilha de dados no sector da construção.

O artigo do *Dr. Guillermo Aranda-Mena* em conjunto com o *Prof. Ron Wakefield* sobre interoperabilidade diz-nos que o IFC é um repositório internacional de *object libraries*, uma representação abrangente do *building model* e de um conjunto de regras e protocolos para definição dos dados que descrevem o edifício [44].

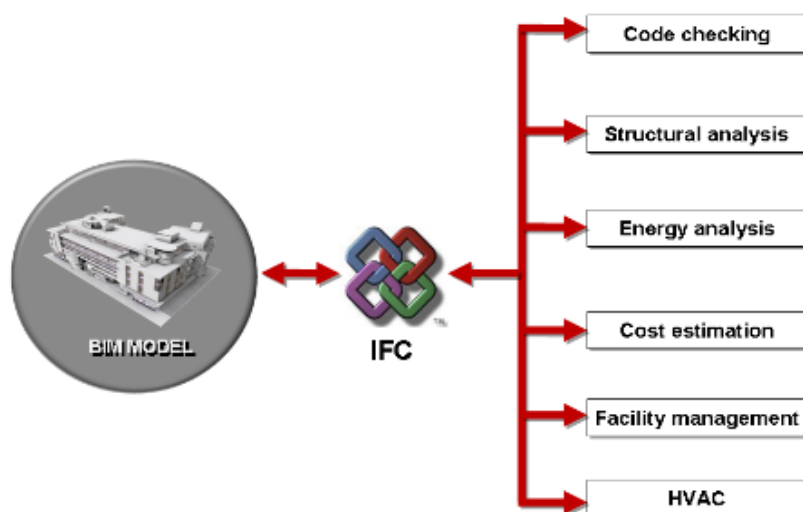


Figura 2.10 – IFC como junção das diferentes especialidades num modelo BIM (*BuildingSMART*)

O primeiro formato de IFC foi lançado em 1997 e até hoje a empresa *BuildingSMART* procede à complementação e implementação do formato para permitir a constante evolução da capacidade de suporte de informação do formato. A versão atual do formato IFC é a 4 (IFC4).

Seguindo as informações prestadas pelo artigo acima referido e pela dissertação de *Marcelo Magalhães [12]* é-nos dito que as vantagens associadas ao uso do formato IFC são:

- Compilação automática de listas de materiais em formato digital, estimativas de custos e planeamento temporal. As quantidades podem então ser utilizadas para a preparação, produção e entregas por parte dos fabricantes;
- Geração automática de clima para simulação de gastos energéticos de todos os espaços;
- Menos erros de coordenação;
- Bibliotecas de produtos;
- Extensão para infraestruturas.

Apesar de o IFC já ser capaz de responder à maioria das necessidades de interoperabilidade, existem ainda alguns problemas no que toca à realização da interoperabilidade da maneira mais correta. Estes problemas não se devem ao formato IFC mas às ferramentas BIM disponíveis. O que é referido pela tese de *Voytek Pniewski [21]* é que a grande maioria do *software* criado numa fase anterior à implementação da metodologia BIM era visto como uma ferramenta *standalone* e apesar de presentemente existir um esforço das empresas em criar ferramentas com capacidades BIM, ou capazes de processar e transformar os dados *standalone* em informação BIM *compatible*, ainda existem limitações e incompatibilidades na partilha de dados entre alguns programas. Chegam a existir casos em que a informação não é reconhecida ou é duplicada e por isso é ainda comum o uso do BIM *Level 2* uma vez que o *Level 3* pode estar exposto a situações de incoerência na informação colocada sobre o modelo.



Figura 2.11 – Cruzamento de formatos num modelo BIM

Apesar dessas limitações, um empreendimento no sector de construção executado sobre uma plataforma interoperável é sempre melhor que uma solução oposta.

Ainda nos é esclarecido por *Voytek Pniewski* [21] e também por *Hugo Sousa* [17] que está comprovado que a não interoperabilidade de *software* no sector da construção conduz:

- A um aumento de despesas;
- A um défice na replicação de dados, verificação de documentos e fluxo de trabalho;
- Gastos elevados em formação e requalificação profissional;
- Marginalização de novas ferramentas por parte das empresas de *software*;
- Falta de concorrência empresarial a nível de acessibilidade a *software* de apoio;
- Desenvolvimento ineficiente da análise de interfaces pertinentes à evolução do sector.

2.1.3 *Shanghai Tower* um caso de sucesso BIM

A *Shanghai Tower* é, até à data, o segundo maior edifício do mundo. Com 632 metros de altura e 121 pisos, este edifício multifuncional conta com 9 zonas de interação distintas, uma média de 12 a 15 pisos por zona, e detém na sua composição 7 sistemas estruturais e mais de 30 subsistemas elétricos, mecânicos e inteligentes. Consta na página da Arch2O [41] que esta é uma estrutura complexa que empreendeu um grande número de especialistas e profissionais de diferentes disciplinas para execução de um trabalho conjunto. Mais de 30 empresas de consultoria estiveram envolvidas no estudo da arquitetura, engenharia estrutural, mecânica e elétrica, proteção contra incêndio e dimensionamento de paredes cortina. Também contou com uma dúzia de subcontratos para execução de fundações, estruturas e equipamentos mecânicos.

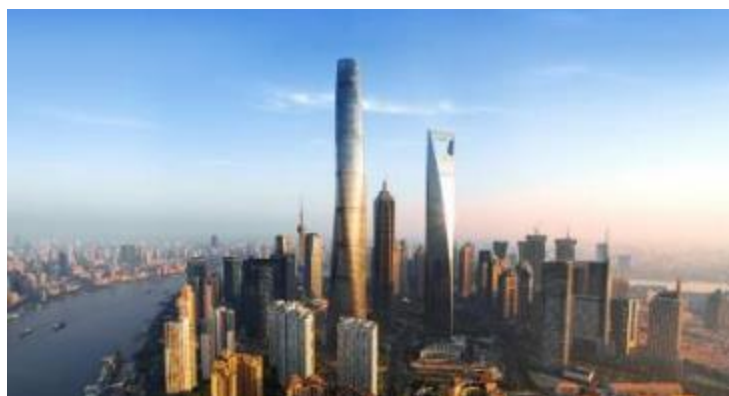


Figura 2.12 – *Shanghai Tower*, China (Arch2O)

Inaugurado em 2015 e com a metodologia BIM implementada desde 2008, ano em que se iniciou o projeto. Através do uso de ferramentas BIM para planeamento, a obra foi concluída no prazo estimado, diversas simulações de comportamento estrutural permitiram alcançar a arquitetura final, poupar cerca de 50 milhões de dólares (USD) na estrutura resistente do edifício e reduzir em cerca de 32% o uso de materiais de construção face ao que tinha sido inicialmente estimado.

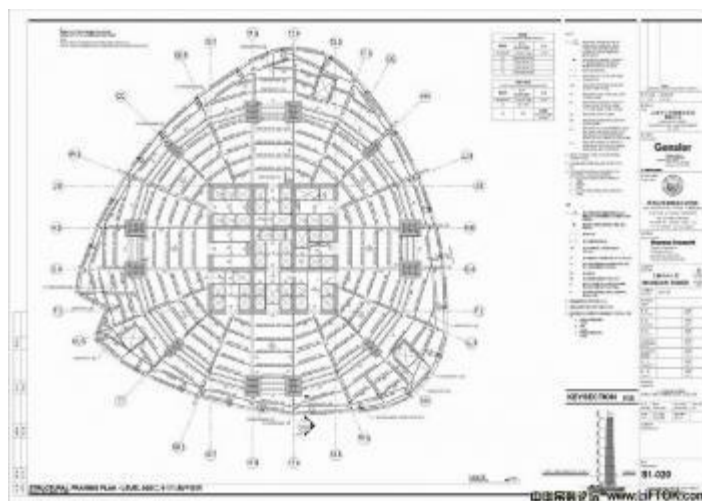


Figura 2.13 – Planta Estrutural de um dos pisos da *Shanghai Tower* (Arch2O)

2.1.4 Panorama de aplicação BIM

Usando novamente como referência as informações da *Between Poles* [33] e da *Construction21* [32], assim como de alguns artigos e notícias partilhados *online*, o uso do BIM já não é reconhecido como apenas uma opção mas uma obrigação na execução de projetos de construção do sector público em várias nações mundiais. Países como a Noruega, Reino Unido, Estados Unidos, Singapura, entre outros, já contam com documentos mandatados pelos órgãos de governação nacional para uso de BIM em investimentos e obras públicas. Na europa, o uso de BIM, além de ser obrigatório no Reino Unido, é uma realidade nos projetos de construção nos países nórdicos como Noruega ou Finlândia, e encontra-se em expansão para a zona central da europa com países como a Alemanha e França a desenvolverem documentos para aplicação do uso BIM no sector público. Espanha conta implementar documentos semelhantes até 2018.

O uso da metodologia promovida pelo BIM é cada vez mais um recurso que todos os clientes, em busca de investir num empreendimento de construção, procuram dadas as largas vantagens e resultados obtidos em projetos de igual ou semelhante porte.

Em Portugal já é aconselhada a adoção desta metodologia por parte de alguns organismos especializados, empresas e organizações que promovem a formação. Cursos BIM promovidos pela Ordem dos Engenheiros e a aposta de algumas instituições de ensino superior na formação em *software* BIM ao longo do período de aquisição de competências dos seus estudantes são outros dos fatores de desenvolvimento na aplicação desta metodologia. A união entre estes diversos organismos é feita sob a alçada da comissão técnica de normalização CT 197 - *Building Information Modelling* (BIM).

A implementação desta metodologia precisa do apoio governativo para que os resultados obtidos a longo prazo sejam visíveis de forma significativa num panorama nacional, a falta de apoio acaba por acentuar a resistência por parte de alguns dos intervenientes do sector da construção. Esse receio de aderir ao BIM não é descabido, os ganhos previstos pelo uso da metodologia não são imediatos e existe um período para aquisição de competências com um custo associado à formação e ao *software* com tecnologia BIM. Existem outros fatores, processuais e tecnológicos, inerentes à resistência para a adoção do modelo de projeto BIM, mas que cada vez mais vêm reduzidas a sua significância na hora da aceitação do sistema.

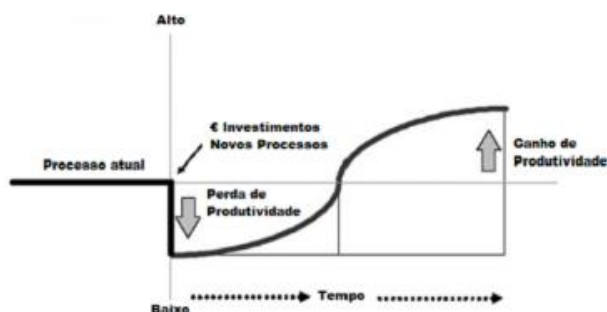


Figura 2.14 – Produtividade de projeto durante a implementação do sistema BIM (Hugo Sousa)

2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO

Hoje em dia é impensável realizar uma análise estrutural sem o auxílio de uma ferramenta de cálculo automática. A facilidade com que cada engenheiro de estruturas, presentemente, consegue aceder a um *software* de análise estrutural é, praticamente, ilimitada. É claro que cada programa de análise possui mais ou menos limitações e condicionamentos de análise. Existem ainda os que são capazes de realizar o dimensionamento estrutural em função da regulamentação aplicável facilitando o processo de dimensionamento dos vários elementos que compõe a estrutura.

Apesar de o conceito de dimensionamento estrutural ser uma ciência exata relativamente recente, o uso de regulamentação e procedimentos de cálculo são uma realidade fundamental para a correta conceção estrutural. A *Interesting Engineering* [47], página com artigos de curiosidade sobre engenharia, refere que conceitos fundamentais de mecânica dos solos não foram totalmente compreendidos até à última metade do século XIX. Até serem determinadas fórmulas teóricas e empíricas para o carregamento de edifícios, bem como de geologia, as estruturas eram em grande parte construídas sem se saber qual o comportamento que iriam ter. Esse risco é evitado através dos programas de análise capazes de simular os efeitos da grande maioria dos casos de carga afetos à estrutura. Mas são os regulamentos que trazem os métodos de cálculo estrutural para dimensionamentos mais ou menos conservativos, mas sempre pelo lado da segurança. O incumprimento das diretivas regulamentares é uma infração grave e é inaceitável nos dias que correm proceder ao desenvolvimento de um projeto de estruturas sem ter em conta esses documentos.

O procedimento para a execução de um projeto, seguindo o ideal BIM, consiste na criação do modelo de arquitetura, passando esse mesmo modelo para a fase de análise e estudo estrutural. Após a obtenção de todos os esforços e quaisquer outras situações relevantes, é realizado o dimensionamento seguindo as diretivas regulamentares nacionais, ou internacionais, desde que em conformidade com o panorama nacional legislativo. É um seguimento lógico bastante simples, mas é um processo que é feito de forma iterativa e repetida até existir um consenso entre as diversas especialidades.

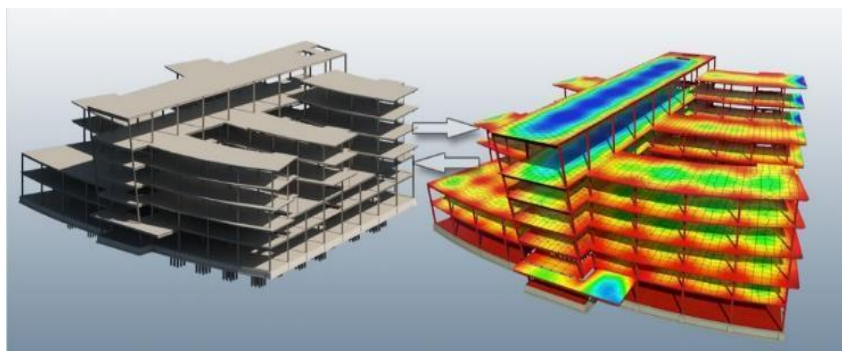


Figura 2.15 – Ciclo de modelação e análise (Autodesk)

2.2.1 Regulamentos

O foco da regulamentação aqui estudada é realizado para a situação nacional e é feito um *overview* da situação europeia. É impossível fazer uma sem a outra uma vez que Portugal já adotou parcialmente as normativas europeias, os intitulados Eurocódigos (EC).

Encontra-se exposto na página do LNEC relativa à CT-115, comissão técnica responsável pela implementação dos Eurocódigos estruturais, que antes de Portugal aderir à conjuntura europeia, o país já possuía regulamentos para o dimensionamento de estruturas, fossem elas de betão armado ou de aço. Alguns destes documentos ainda se encontram em vigor, como é o caso do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP), Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios (REAE) e o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP), todos eles em vias de serem revogados pela entrada a solo dos Eurocódigos como normas a seguir no quadro legal de dimensionamento estrutural em Portugal. Atualmente existem 58 partes de Normas Europeias (EN) relativas aos Eurocódigos divididas por 9 Eurocódigos Estruturais. Em Portugal o órgão responsável pela passagem das Normas Europeias a Normas Portuguesas (NP) é o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a sua publicação é facultada pelo Instituto Português de Qualidade (IPQ). Os planos nacionais atuais focam-se na produção de NP EN de 38 das 58 partes existentes, cerca de 80% da documentação europeia. Entre 2009 e 2010, dezasseis dessas partes já haviam sido publicadas, atualmente já existem mais de vinte.

O organismo máximo europeu para elaboração de EN EC é o Comité Europeu de Normalização (CEN) e os planos atuais do organismo relativamente à normalização existente consistem na manutenção, revisão e elaboração de novos documentos e promoção e harmonização das diretivas através da liberdade para a complementação das normas com Anexos Nacionais. A implementação desses anexos é vista como um revés pelo CEN que procura identificar essas diferenças, analisar e proceder a uma proposta para uma futura harmonização normativa.

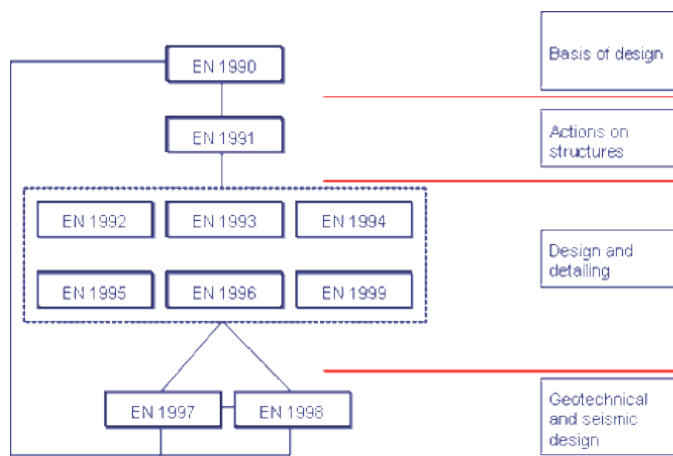


Figura 2.16 – Relação esquemática entre Eurocódigos e a sua base de aplicação

2.2.1.1 NP EN 1992-1-1:2010

A parte relevante para o desenvolvimento proposto neste estágio é a parte 1 do Eurocódigo 2 relativa a regras gerais e regras para edifícios em projetos de estruturas de betão betonado “*in situ*”.

Serão abordadas as expressões e alguns procedimentos de cálculo utilizados para a definição de requisitos máximos e mínimos em elementos de betão de estruturas porticadas, uma vez que o tema em foco neste relatório é alusivo às disposições construtivas no que respeita a pórticos de betão armado. Desde generalidades de posicionamento dos diversos tipos de armadura, pontos de emenda e amarração em vigas, pilares e lajes. Não são abordados todos os conteúdos e disposições do Eurocódigo, já que nem todos se enquadram no tema deste relatório. Existem outros Eurocódigos, como o EC8, que possuem regras e disposições construtivas adicionais para estruturas do tipo aqui tratado, mas que não serão versadas no objeto deste relatório.

2.2.1.1.1 Requisitos e Disposições Gerais em Elementos Betonados “*In Situ*”

Recobrimento

O recobrimento das armaduras é um requisito de durabilidade da estrutura que se encontra diretamente ligado à classe de exposição e tempo de vida útil. O EC2 indica, no capítulo 4 da sua composição, quais as classes de exposição e outros requisitos mínimos a cumprir para garantir que a estrutura possui a proteção necessária para se manter em funções durante o seu tempo de vida. Abaixo ficam os principais pontos a considerar na definição do recobrimento nominal.

$$4.4.1.1 \text{ (2)P} \quad c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (4.1)$$

$$4.4.1.2 \quad c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad (4.2)$$

(1)P, (2)P, (3)

| | |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| c_{nom} | Recobrimento nominal |
| c_{min} | Recobrimento mínimo |
| Δc_{dev} | Tolerâncias de execução, 4.4.1.3 (1)P |
| $c_{min,b}$ | Recobrimento mínimo para os requisitos de aderência, 4.4.1.2 (3) |
| $c_{min,dur}$ | Recobrimento mínimo relativo às condições ambientais, 4.4.1.2 (5) |
| $\Delta c_{dur,\gamma}$ | Margem de segurança, 4.4.1.2 (6) |
| $\Delta c_{dur,st}$ | Redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável, NA-4.4.1.2 (7) |
| $\Delta c_{dur,add}$ | Redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional, NA-4.4.1.2 (8) |

“O recobrimento nominal é a distância entre a superfície da armadura que fica mais próxima da superfície de betão e esta última” – EC2 4.4.1.1 (1)P – O regulamento fornece indicações base para se proceder ao cálculo desta distância. Em Portugal é fornecida uma tabela com os valores de recobrimento mínimo e nominal para estruturas concebidas para um período útil de 50 e 100 anos, facilitando a definição destes requisitos, mas também é indicado, em Anexo Nacional, que devem ser seguidas as disposições estabelecidas pelo LNEC nas especificações E 469, E 465 e E 461 relativos a espaçadores para armaduras, estimativa de desempenho em classes XC e XS e prevenção de reações expansivas internas.

Tabela 2.2 – Recobrimentos mínimos e nominais
para períodos de vida útil de 50 e 100 anos (Quadro NA.II do EC2)

| | | X0 | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------|----|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Tempo de vida útil de projecto de 50 anos (Classe Estrutural S4) | Recobrimento mínimo (mm) | 10 | 15 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| | Recobrimento nominal (mm) | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| Tempo de vida útil de projecto de 100 anos (Classe Estrutural S6) | Recobrimento mínimo (mm) | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| | Recobrimento nominal (mm) | 30 | 35 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |

Distância entre varões

Este requisito tem como principal justificação a necessidade de garantir a correta betonagem e compactação do betão, assim como as condições de aderência. O ponto 8.2 do EC2 fornece as principais diretivas para definição desta distância, mas em casos em que ocorra a sobreposição de varões devem observar-se as prescrições do ponto 8.7.

$$8.2 (2) \quad d_{livre} \geq \{k_1 * \emptyset; d_g + k_2; 20 \text{ mm}\}$$

d_{livre} Distância livre (horizontal e vertical) entre varões paralelos ou entre camadas horizontais de varões paralelos

\emptyset Diâmetro do varão

d_g Dimensão máxima do agregado

$k_1; k_2$ Constantes de cálculo com valor recomendado de 1 mm e 5 mm, respetivamente

No que respeita às sobreposições, é importante seguir as guias dispostas no ponto 8.7.2 que indicam que as sobreposições devem ser desfasadas e não ficar localizadas em zonas de esforços elevados, assim como o dever de aplicação dessas sobreposições de forma simétrica. As distâncias livres a garantir encontram-se referenciadas no ponto 8.7.2 (3) e para facilitar a compreensão dessas disposições é fornecido pelo EC2 uma figura exemplificativa das mesmas.



Figura 2.17 –Sobreposições adjacentes (Figura 8.7 do EC2)

Amarração

Este é um requisito que deve ser assegurado para ser garantida uma boa transferência das forças de aderência ao betão, evitando a fendilhação longitudinal ou o destacamento do betão. Os principais pontos a ter em consideração são o 8.4, 8.5 e 8.7 do EC2. O ponto 8.6 é relativo à amarração entre varões soldados, não sendo aqui ponderado por não fazer parte da tipologia de armadura considerada neste relatório.

$$8.4.4 (1) \quad l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (8.4)$$

$$8.4.3 (2) \quad l_{b,rqd} = (\sigma_s / 4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) \quad (8.3)$$

$$8.4.2 (2) \quad f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (8.2)$$

$$8.7.3 (1) \quad l_o = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rqd} \geq l_{o,min} \quad (8.10)$$

l_{bd} Comprimento de amarração de cálculo

$l_{b,rqd}$ Comprimento de amarração de referência

Comprimento de amarração mínimo se não existir nenhuma outra limitação

$l_{b,min}$ – Em varões tracionados: $l_{b,min} \geq \max\{0,3 l_{b,rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\}$

– Em varões comprimidos: $l_{b,min} \geq \max\{0,6 l_{b,rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\}$

f_{bd} Tensão de rotura de aderência, valor de cálculo

f_{ctd} Resistência do betão à tracção, valor de cálculo

l_o Comprimento de sobreposição

$l_{o,min}$ Comprimento de sobreposição mínimo, $l_{o,min} \geq \max\{0,3 \alpha_6 l_{b,rqd}; 15\phi; 200 \text{ mm}\}$

α_1 a α_5 Coeficientes definidos no Quadro 8.2 do EC2

α_6 Coeficiente dado em função da percentagem de armaduras sobrepostas, Quadro 8.3 do EC2

Coefficiente relacionado com as condições de aderência

$\eta_1 = 1$ para boas condições de aderência

η_1

$\eta_1 = 0,7$ para todos os outros casos e para varões em elementos construídos com cofragens deslizantes

Relacionado com o diâmetro do varão

η_2

$\eta_2 = 1$ para $\phi \leq 32 \text{ mm}$

$\eta_2 = (132 - \phi)/100$ para $\phi > 32 \text{ mm}$

ϕ

Diâmetro dos varões

Em termos de comprimento de amarração de cálculo, o valor do mesmo encontra-se muito dependente dos fatores de influência ligados aos coeficientes α , assim como o comprimento de sobreposição. Estes são determinados em função do tipo de amarração, do tipo de cintagem, do recobrimento e da forma dos varões. A tabela é relativamente extensa pelo que é aconselhada a consulta do Quadro 8.2 do EC2 para ser mais fácil a compreensão dos fatores de influência.

Existe no EC2 a alternativa de simplificar o cálculo do comprimento de amarração aplicando um comprimento de amarração equivalente em algumas situações especificadas na figura 8.1 do EC2

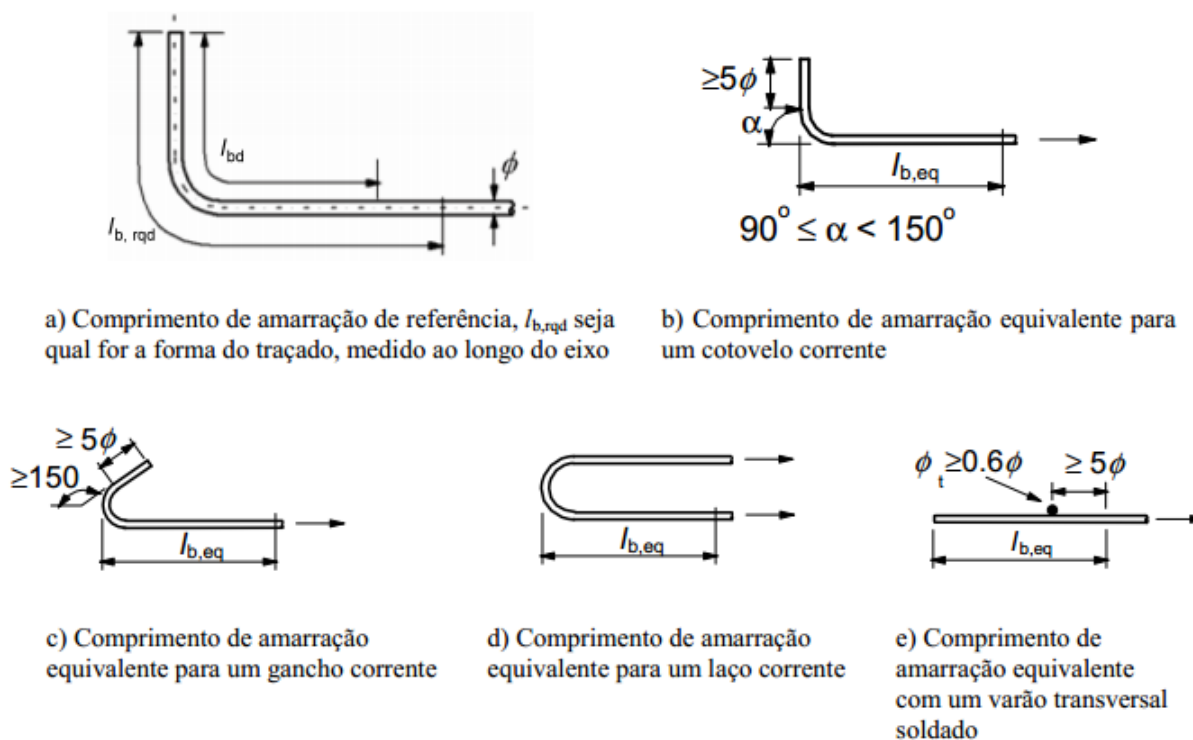


Figura 2.18 – Tipos de amarração para além da de prolongamento reto (Figura 8.1 do EC2)

O $l_{b,eq}$ encontra-se definido no ponto 8.4.4 (2).

Nas zonas de sobreposição o valor de l_o já não é reduzido, mas sim agravado em função da percentagem de armaduras sobrepostas numa dada secção. Isto acontece, porque, tal como nos varões de grande diâmetro, quanto maior a concentração da área de aço num elemento de betão, maior é a concentração de tensões em torno das zonas de amarração. Fica aconselhada a consulta da figura 8.8 do EC2.

É ainda exigido para as zonas de sobreposição que sejam aplicadas armaduras transversais para confinamento das armaduras longitudinais nas zonas de emenda. O que o EC2 nos indica é que em situações onde a armadura longitudinal possui um diâmetro de varões inferior a 20 mm, a armadura transversal aplicada por outros motivos é suficiente para garantir o equilíbrio das forças transversais de tracção/compressão. A diferença entre as situações de emenda em zonas de compressão em relação às de tracção é que as zonas de compressão obrigam à aplicação de um elemento de armadura transversal adicional colocada após a interrupção da amarração. Nos casos em que o diâmetro é superior a 20 mm, a área da armadura transversal deve ser, no mínimo, igual à área de armadura de um dos varões de sobreposição. Consultar a figura 8.9 do EC2 e o ponto 8.7.

Existem regras adicionais para varões de grande diâmetro, $\phi > 32$ mm, no ponto 8.8 do EC2 que remetem para a aplicação de armaduras de pele para controlo da fendilhação e para o uso de amarrações retas com armaduras transversais adicionais. Apesar de o EC2 dar indicações sobre a sobreposição deste tipo de elementos, também diz que só é possível assumir a possibilidade de sobreposição de varões de grande diâmetro em secções com uma dimensão mínima de 1 metro ou quando a tensão nas armaduras não excede 80% da resistência última de cálculo.

O EC2 refere ainda regras de amarração para situações em que é considerado o agrupamento de varões no ponto 8.9 do respetivo regulamento, aqui é evitado o uso deste tipo de disposição construtiva, pelo que não é analisada a situação.

O ponto 8.5 do EC2 estabelece as regras de amarração para cintas transversais e armaduras de esforço transverso. As regras para cintas e estribos não soldados encontram-se expostas na figura seguinte:

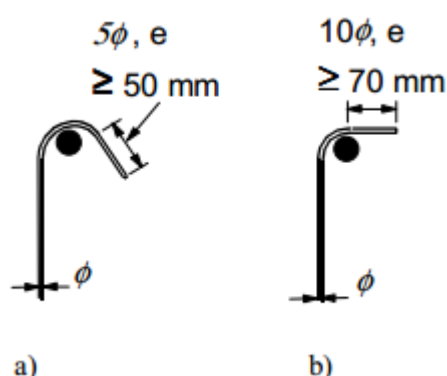


Figura 2.19 – Amarração de cintas (caso a) e b)) (Figura 8.5 do EC2)

Aproveitando as armaduras transversais relativamente à curvatura dos mandris, aquilo que o regulamento diz é que, a fim de não danificar a armadura, o diâmetro de dobragem de um varão não deve ser inferior a $\phi_{m,min}$. Esta regra é aplicável a qualquer varão.

Seguindo as diretivas do ponto 8.3 no Quadro 8.1N do EC2 relativo a varões e fios tem-se:

Tabela 2.3 – Diâmetro do mandril a fim de não danificar a armadura, varões e fios
(Quadro 8.1N a) do EC2)

| <i>Diâmetro do varão</i> | <i>Diâmetro mínimo do mandril para cotovelos, ganchos e laços (ver a Figura 8.1)</i> |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi \leq 16 \text{ mm}$ | 4ϕ |
| $\phi > 16 \text{ mm}$ | 7ϕ |

A figura 8.1 referida na tabela é a figura 2.18 do presente relatório.

Este diâmetro mínimo só é aceite se forem cumpridas as condições afetas ao ponto 8.3 (3). Caso não se verifiquem estas condições, o diâmetro mínimo é agravado em função da seguinte expressão:

$$8.3 (3) \quad \phi_{m,min} \geq F_{bt}((1/a_b) + 1/(2\phi))/f_{cd} \quad (8.1)$$

F_{bt} Força de tracção devida às ações últimas no início da parte curva de um varão ou de um agrupamento de varões em contato

a_b $a_b = c + \phi/2$

c Recobrimento

ϕ Diâmetro do varão

f_{cd} Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão, $\leq C55/67$

Ainda relacionado com as disposições gerais o EC2, no ponto 6.5.4 (7), relativamente à amarração em nós sujeitos a compressão e tracção, refere que o comprimento de amarração, nestas zonas, deve ser prolongado ao longo de toda a extensão do nó e em certos casos até poderá ser amarrada para lá do mesmo.

Controlo de fendilhação

Para terminar com as disposições gerais devem ainda ser observadas as prescrições relativas ao controlo de fendilhação. O EC2 refere no ponto 7.3.1 (2) que a fendilhação é normal em estruturas de betão sujeitas a flexão, esforço transversal, torção ou tracção resultantes de ações diretas de ou de coação ou de deformações impostas. Por isso mesmo, o EC2 estipula valores máximos de fendas em função da classe de exposição da estrutura. Também indica expressões e regras para cálculo de áreas de armadura mínimas para controlo do fenómeno de fendilhação. O anexo J do regulamento possui guias para

definição da área de armadura de pele necessária e o ponto 7.3.2 exibe uma expressão, para cálculo da armadura mínima, seguidamente apresentada.

$$7.3.2 (2) \quad A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct} \quad (7.1)$$

| | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{s,min}$ | Área mínima das armaduras |
| σ_s | Tensão máxima admissível na armadura logo após a formação da fenda |
| k_c | Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção |
| k | Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas |
| $f_{ct,eff}$ | Valor médio da resistência do betão à tracção à data em que se prevê a formação das primeiras fendas |
| A_{ct} | Área de betão traccionado |

O cálculo da armadura mínima poderá ser efetuado usando a expressão (7.1), mas caso exista a possibilidade de usar métodos de cálculo mais rigorosos capazes de definir áreas de cálculo menores, o EC2 dá liberdade para tal, desde que devidamente justificados. O EC2, para simplificar as regras para definição do diâmetro e do espaçamento máximo de varões, fornece dois quadros que partem de algumas suposições, mas dão uma ideia das disposições a garantir para um controlo adequado à classe de exposição da estrutura.

Tabela 2.4 – Controlo de fendilhação (Quadro 7.2N e 7.3N do EC2)

| Tensão no aço ²⁾ [MPa] | Diâmetros máximos dos varões [mm] | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
| | $w_k = 0,4 \text{ mm}$ | $w_k = 0,3 \text{ mm}$ | $w_k = 0,2 \text{ mm}$ |
| 160 | 40 | 32 | 25 |
| 200 | 32 | 25 | 16 |
| 240 | 20 | 16 | 12 |
| 280 | 16 | 12 | 8 |
| 320 | 12 | 10 | 6 |
| 360 | 10 | 8 | 5 |
| 400 | 8 | 6 | 4 |
| 450 | 6 | 5 | - |

| Tensão no aço ²⁾ [MPa] | Espaçamento máximo dos varões [mm] | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|
| | $w_k = 0,4 \text{ mm}$ | $w_k = 0,3 \text{ mm}$ | $w_k = 0,2 \text{ mm}$ |
| 160 | 300 | 300 | 200 |
| 200 | 300 | 250 | 150 |
| 240 | 250 | 200 | 100 |
| 280 | 200 | 150 | 50 |
| 320 | 150 | 100 | - |
| 360 | 100 | 50 | - |

Estes valores são obtidos a partir das expressões para o cálculo da largura de fendas, ponto 7.3.4 do EC2, e têm as hipóteses de cálculo presentes nas notas 1) e 2) do ponto 7.3.3 do EC2.

2.2.1.1.2 Requisitos e Disposições para Vigas Betonadas “*In Situ*”

Armaduras longitudinais

Em relação às regras relativas a vigas, o EC2 considera que os requisitos de segurança, utilização e durabilidade são satisfeitos com a aplicação das regras indicadas na secção 9 do respetivo regulamento. Situação aplicável a todos os elementos de betão armado avaliados na dita secção.

Começando pelas regras para armaduras longitudinais temos:

$$9.2.1.1 (1) \quad A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \geq 0,0013 b_t d \quad (9.1N)$$

| | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{s,min}$ | Área mínima de armadura |
| f_{ctm} | Valor médio de tensão de rotura do betão à tracção simples |
| f_{yk} | Valor característico da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras de betão armado |
| b_t | Largura média da zona tracionada |
| d | Altura útil da secção transversal |

Esta área de armadura mínima é aplicável a todos os elementos primários da estrutura. Em elementos secundários esta regra poderá ser substituída pela possibilidade de aplicar um valor de armadura mínima igual a 1,2 vezes a área de armadura necessária para verificação do estado limite último. Ainda assim, se estes elementos possuírem uma área de armadura inferior à mínima, terão de ser considerados como elementos não armados e respeitar as regras adicionais para elementos fracamente armados da secção 12 do EC2.

$$9.2.1.1 (3) \quad A_{s,max} = 0,04 A_c \quad \text{NOTA}$$

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| $A_{s,max}$ | Área máxima de armadura |
| A_c | Área da secção transversal de betão |

A expressão acima vem de uma nota de recomendação, uma vez que o EC2 indica que o valor máximo poderá ser estipulado em Anexo Nacional. Como em Portugal não é dito nada em contrário, este é o valor a considerar. Este limite é aplicável tanto às armaduras de tracção como às de compressão e é excluída a sua obrigatoriedade em zonas de emenda. Semelhante às disposições aplicadas a pilares para zonas de emenda.

Em relação às zonas de apoio comuns, apoio simples ou intermédios, a armadura deverá ser dimensionada para um momento flector correspondente a um encastramento parcial, seguindo o

recomendado pelo ponto 9.2.1.2 do EC2 o valor desse momento deve ser igual a 15% do valor do momento flector máximo do vão. Em todo o caso, é aplicável o limite mínimo de armadura da expressão (9.1N).

Em vigas T é ainda exigido que a armadura de tracção no banzo seja distribuída ao longo da largura efetiva, permitindo ainda que parte desta armadura se concentre na largura da alma.

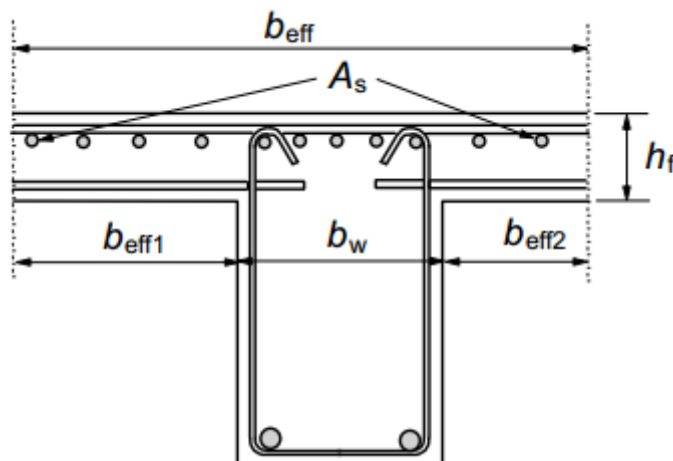


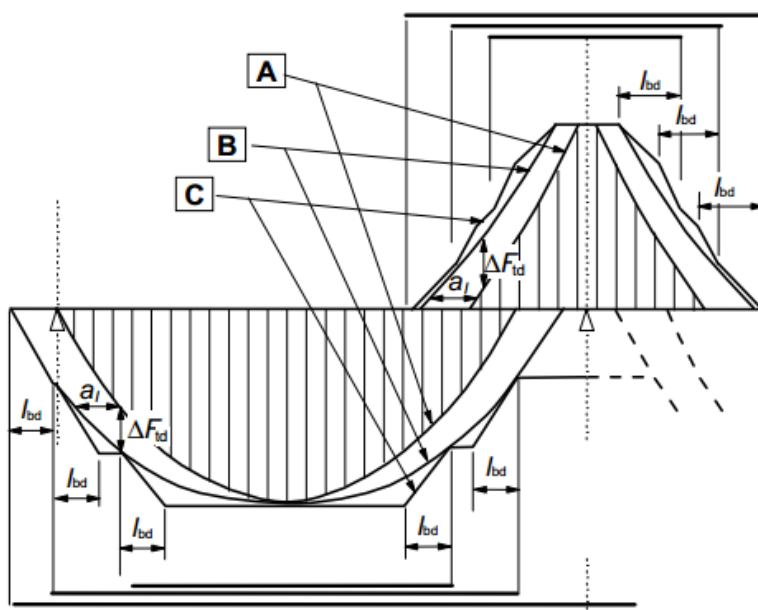
Figura 2.20 – Disposição da armadura de tracção numa secção em T (Figura 9.1 do EC2)

Uma disposição mais ligada às armaduras transversais, prende-se com a necessidade de aplicar armaduras transversais com um espaçamento menor ou igual a 15 vezes o diâmetro da armadura longitudinal de compressão.

A nível de dispensa das armaduras longitudinais de tracção, o que o EC2 indica que em qualquer secção deve existir sempre armadura suficiente para resistir à envolvente da força de tracção atuante. A partir da zona de momento nulo é aplicável a possibilidade de dispensa a 100% mas não sem antes aplicar uma extensão adicional da armadura referente a uma translação do diagrama de momentos igual a uma distância a_l . Essa distância é igual ao comprimento da altura útil da secção (d), em elementos sem armadura de esforço transversal, e é alusiva a um acréscimo de força de tracção (ΔF_{td}) nas armaduras longitudinais devido ao esforço transversal atuante. Para elementos com armadura transversal o valor de a_l é dado pela seguinte expressão:

$$9.2.1.3 (2) \quad a_l = z(\cot \theta - \cot \alpha)/2 \quad (9.2)$$

| | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| a_l | Distância de translação do diagrama de momentos |
| z | Braço binário das forças interiores, pode ser considerado como valor aproximado $z = 0,9d$ |
| θ | Ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga |
| α | Ângulo formado pela armadura de esforço transversal com o eixo da viga |



[A] - Envolvente de $M_{Ed}/z + N_{Ed}$ [B] - força de tração actuante F_s [C] - força de tração resistente F_{Rs}

Figura 2.21 – Representação da interrupção da armadura longitudinal (Figura 9.2 do EC2)

É possível perceber pela figura 2.21 que o comprimento de amarração de cálculo deve ser ligeiramente superior à distância de translação do diagrama, para facilitar é empregue a seguinte regra no cálculo do comprimento de amarração de armaduras superiores.

$$l_{bd} \geq a_l + l_{b,min}$$

Na amarração de armaduras inferiores a primeira disposição regulamentar apresentada é relativa à área de armadura instalada em apoios extremos com grau de encastramento fraco ou nulo. No ponto 9.2.1.4 refere-se que a área de armadura instalada deve ser pelo menos 25% da área instalada no vão, valor recomendado. De seguida o EC2 refere que pode ser aplicada a regra da translação, mas que o comprimento de amarração é determinado em função do ponto 8.4.4 do EC2, já aqui abordado.

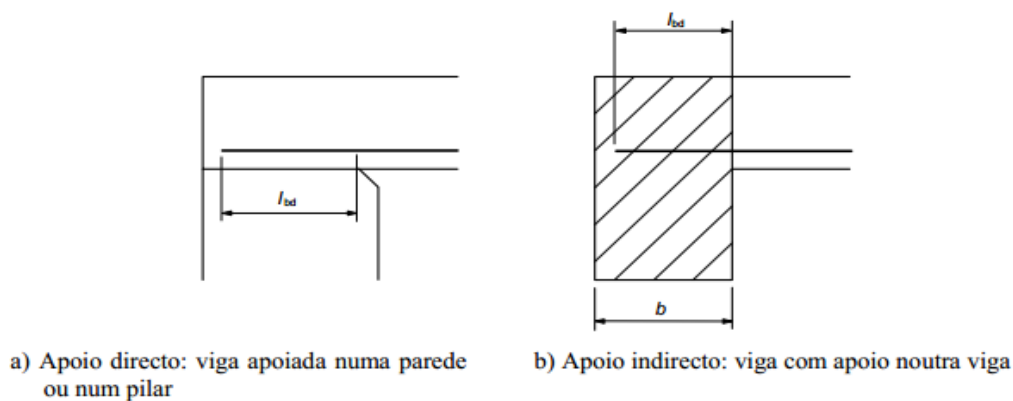


Figura 2.22 – Amarração das armaduras inferiores em apoios extremos (Figura 9.3 do EC2)

Na amarração de apoios intermédios é aplicado o mesmo limite mínimo de armadura na zona de amarração sobre o apoio. Convém lembrar que esses 25% de área devem ser superiores ao valor de armadura mínima, a não ser que se tratem de vigas secundárias, em qualquer tipo de apoio. E o comprimento de amarração mínimo deve ser maior ou igual a 10 vezes o diâmetro do varão, ou diâmetro do mandril, em varões com pelo menos 16 mm de diâmetro. Nas restantes situações de amarração onde seja imposto um mandril com varões de diâmetro inferior a 16, o valor de amarração deve ser no mínimo duas vezes o diâmetro do mandril.

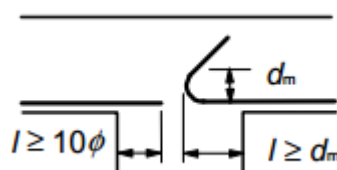


Figura 2.23 – Amarração em apoios intermédios (Figura 9.4 a) do EC2)

Em estruturas onde as ações de acidente consideradas potenciem a inversão do momento no apoio para um momento positivo, são especificadas pelo EC2 dois tipos de amarração contínuas para garantir a segurança estrutural.

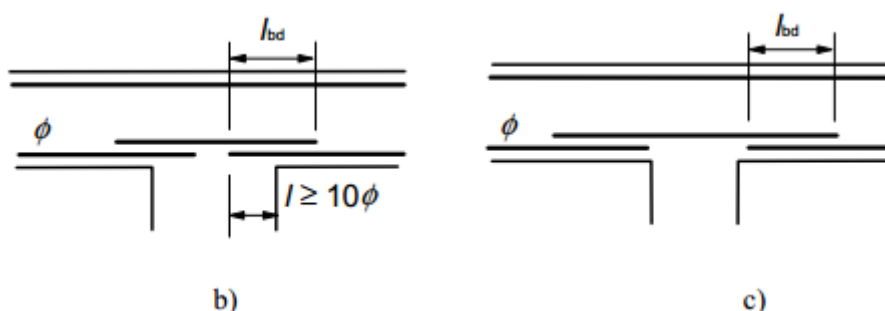


Figura 2.24 – Amarração em apoios intermédios (Figura 9.4 do EC2)

Armaduras transversais

As armaduras transversais devem formar um ângulo entre os 45° e os 90° com o eixo longitudinal do elemento estrutural.

$$45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

Estas podem ser constituídas por estribos com ou sem a total envoltória sobre a armadura longitudinal, varões inclinados e qualquer outro elemento com capacidade de resistir aos esforços e que se encontre devidamente amarrado. Esta amarração deve ser garantida de forma eficaz e a emenda por sobreposição é permitida em elementos próximos da face de betão, desde que a armadura não esteja sujeita a esforços de torção.

O EC2 diz ainda que 50% das armaduras de esforço transversal devem ser constituídas por estribos.

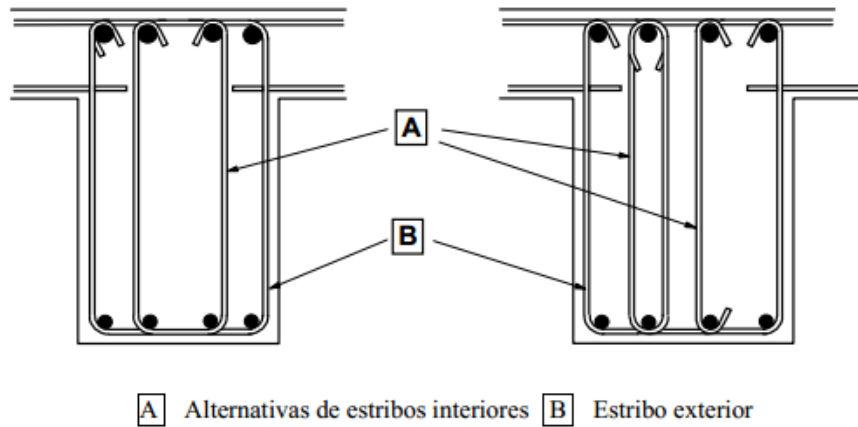


Figura 2.25 – Exemplos de armaduras de esforço transverso (Figura 9.5 do EC2)

A definição de armadura mínima de esforço transverso é alcançada igualando as expressões 9.4 e 9.5N do EC2.

$$\rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin \alpha) \geq \rho_{w,min} \quad (9.4)$$

9.2.2 (5)

$$\rho_{w,min} = (0,08 \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \quad (9.5N)$$

| | |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ρ_w | Taxa de armadura de esforço transverso |
| $\rho_{w,min}$ | Taxa de armadura de esforço transverso mínima |
| A_{sw} | Área de armaduras de esforço transverso existente no comprimento s |
| s | Espaçamento das armaduras de esforço transverso, medido ao longo do eixo longitudinal do elemento |
| b_w | Largura da alma do elemento |
| α | Ângulo formado pelas armaduras de esforço transverso e o eixo longitudinal |

Já a armadura máxima efetiva tem de ser definida seguindo as disposições da secção 6 do EC2, mais concretamente a disposição indicada no ponto 6.2.3 (4) do EC2.

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{\frac{1}{2} \alpha_{cw} v_1 f_{cd}}{\sin \alpha} \quad (6.15)$$

6.2.3 (4)

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (6.13)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta) \quad (6.14)$$

| | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{sw,max}$ | Área efetiva máxima de armaduras de esforço transverso num comprimento s |
| f_{ywd} | Valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso |
| α_{cw} | Coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido, igual a 1 em elementos sem pré-esforço |
| v_1 | Coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso |

(6.6N)

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] (f_{ck} \text{ em MPa}) - \text{Valor recomendado}$$

| | | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| f_{cd} | Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão | |
| $V_{Rd,s}$ | Valor de cálculo do esforço transverso equilibrado pela armadura de esforço transverso na tensão de cedência | |
| $V_{Rd,max}$ | Valor de cálculo do esforço transverso resistente máximo do elemento, limitado pelo esmagamento das escoras comprimidas | |
| θ | Ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga | (6.7N) |
| | $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ | |

O espaçamento referido tanto na situação de cálculo de armadura mínima como da máxima efetiva é o espaçamento longitudinal entre estribos, que é definido no ponto 9.2.2 em conjunto com o espaçamento máximo transversal.

$$9.2.2 (6) \quad s_{l,max} = 0,75d (1 + \cot \alpha) \quad (9.6N)$$

$$9.2.2 (7) \quad s_{b,max} = 0,6d (1 + \cot \alpha) \quad (9.7N)$$

$$9.2.2 (8) \quad s_{t,max} = 0,75d \leq 600 \text{ mm} \quad (9.8N)$$

$s_{l,max}$ Espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transverso

$s_{b,max}$ Espaçamento longitudinal máximo de varões inclinados

$s_{t,max}$ Espaçamento transversal máximo entre ramos de estribos

Estes são os principais pontos de interesse no que toca a armaduras de esforço transverso em vigas, as disposições seguintes são também importantes, mas funcionam como elementos adicionais em vigas.

A primeira vigência adicional é relativa a pormenores de amarração das cintas em situações onde a armadura de esforço transverso tem funções de armadura resistente ao fenómeno de torção.

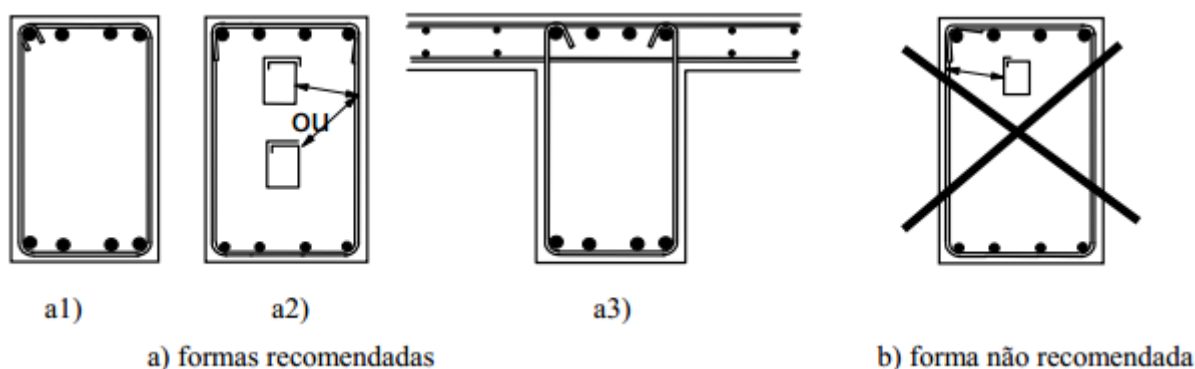


Figura 2.26 – Exemplos de formas de cintas de torção (Figura 9.6 do EC2)

O EC2 obriga a fechar as cintas através de sobreposições e/ou ganchos. A aplicação da expressão para cálculo das armaduras mínimas de esforço transverso é indicada pelo EC2 como suficientes, para a generalidade dos casos, para garantir a quantidade mínima de cintas de torção. Em todo o caso, em

situações específicas onde o esforço de torção seja relevante o EC2 no ponto 6.3 do regulamento indica as bases de cálculo a definição da armadura de torção necessária. Esta armadura de torção da secção não é transversal, mas sim longitudinal.

Para situações de torção é alterado o valor limite máximo para o espaçamento longitudinal, passando este a ser igual ou inferior à oitava parte do perímetro do contorno exterior da secção.

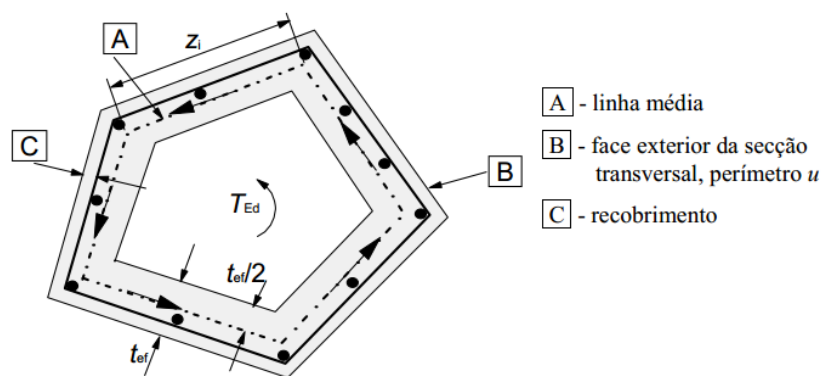


Figura 2.27 – Notações e definições utilizadas na secção 6.3 (Figura 6.11 do EC2)

Ainda relativo à torção, o EC2 diz que numa viga deve existir pelo menos um varão em cada canto e os restantes varões devem ser distribuídos uniformemente ao longo do contorno interno das cintas, com um espaçamento máximo de 350 mm.

O EC2 possui ainda medidas adicionais para vigas em T onde o banzo possa estar sujeito ao corte na zona de ligação com a alma; estas disposições são mais ligadas a um dimensionamento exato, uma vez que o EC2 não possui uma expressão que atribua um mínimo necessário. Tal como em situações de torção, a armadura para resistir a este tipo de fenómenos é dimensionada em função da existência dos mesmos numa estrutura e não é comum a sua instalação na generalidade dos casos.

As armaduras de pele já foram abordadas de forma mais simples nos requisitos gerais, mas é nas vigas que estes têm maior importância. Esta armadura é composta por uma malha e só deve ser aplicada em vigas onde o diâmetro dos varões é superior a 32 mm. Os espaçamentos transversais e longitudinais da malha devem ser, no máximo, 150 mm e o valor da armadura de superfície deve ser maior ou igual a 1% da área de betão tracionado exterior às cintas. Em elementos com recobrimento superior a 70 mm a área pode ser calculada para cada uma das direções como 0,5% da área de betão tracionado exterior às cintas.

As últimas referências relativas a vigas dispostas na secção 9 do EC2 estão relacionadas com a existência de uma situação de apoio indireto. O apoio indireto de uma viga sobre outra obriga à instalação adicional de uma armadura capaz de resistir à reação mútua. Esta é uma regra igualmente aplicável a lajes não apoiadas na parte superior da viga.

O que o EC2 refere que a armadura de suspensão na zona de cruzamento deve ser constituída por estribos envolvendo a armadura principal do elemento de apoio e ainda parte da zona comum às duas vigas.

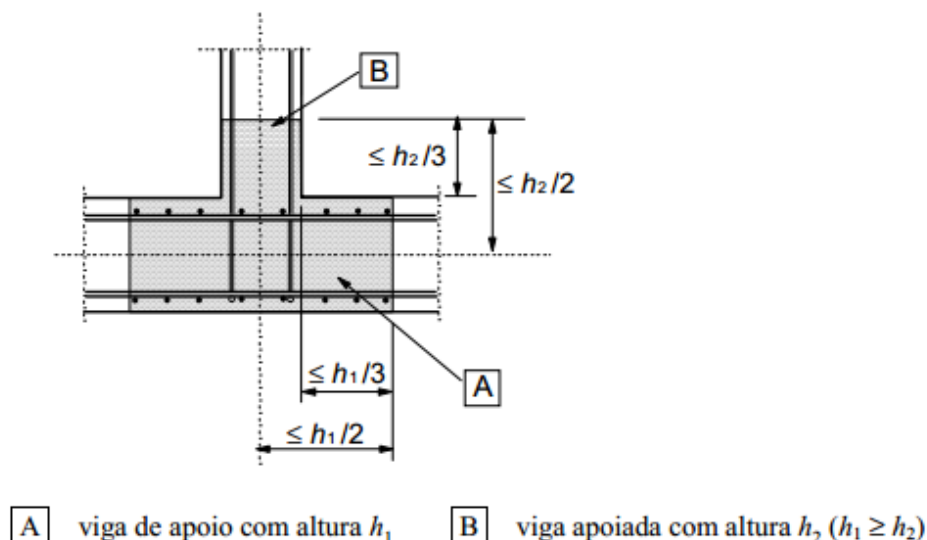


Figura 2.28 – Colocação de armadura de suspensão na zona de intersecção de duas vigas
(vista em planta) (Figura 9.7 do EC2)

2.2.1.1.3 Requisitos e Disposições para Lajes Maciças Betonadas “In Situ”

Armaduras longitudinais

Nas lajes maciças o predisposto no EC2 indica que as regras para definição de armaduras de flexão mínimas e máximas são iguais às regras aplicáveis a vigas, ou seja, os pontos 9.2.1.1 (1) e (3). Tem uma regra adicional, igual à das vigas para situações em que a laje possa estar exposta a um risco reduzido de rotura frágil, onde é possível considerar como área mínima uma área igual a 1,2 vezes a área necessária para verificação do estado limite último.

Estas regras são aplicáveis a lajes armadas em uma ou duas direções. Em situações de lajes armadas numa só direção é possível considerar a área das armaduras ortogonais de distribuição como 20% da área da armadura longitudinal principal, sempre respeitando os limites mínimos exigidos. Na zona superior da laje pode ser dispensada a utilização de armaduras transversais, na zona junto aos apoios, desde que não exista momento flector no sentido ortogonal.

Mais uma vez as regras aplicadas às vigas são aqui consideradas no que respeita à dispensa de armaduras, tal como já foi aqui abordado, a possibilidade de dispensa é estudada considerando uma translação do diagrama de momentos equivalente a a_l , no caso de a laje não necessitar de armadura de esforço transversal, o valor da translação é igual a d .

Em termos de espaçamentos máximos entre varões, as lajes consideram duas zonas de ação, a zona da envolvente e a zona de momento máximo/cargas concentradas.

Envolvente

Armaduras principais:

$$s_{max,slabs} = 3h \leq 400 \text{ mm}$$

Armaduras de distribuição:

$$s_{max,slabs} = 3,5h \leq 450 \text{ mm}$$

9.3.1 (3)

Momento máximo/Cargas concentradas

NOTA

Armaduras principais:

$$s_{max,slabs} = 2h \leq 250 \text{ mm}$$

Armaduras de distribuição:

$$s_{max,slabs} = 3h \leq 400 \text{ mm}$$

 $s_{max,slabs}$

Espaçamento longitudinal máximo entre varões

 h

Espessura total da laje

Relativamente a pormenores de amarração, o EC2 refere que, para lajes simplesmente apoiadas, metade da armadura instalada no vão deve ser prolongada até ao apoio e ser devidamente amarrada, seguindo as especificações regulamentares para amarração do ponto 8.4.4 do EC2. Em lajes onde exista pelo menos um bordo parcialmente encastrado, e caso este não tenha sido considerado no cálculo, a armadura superior instalada deve ser capaz de resistir a pelo menos 25% do momento máximo do vão adjacente, e ter um comprimento de pelo menos 20% do vão adjacente, medido a partir da face do apoio, ser contínua nos apoios intermédios e amarrada nos apoios extremos. Num apoio extremo, a armadura pode ser reduzida para uma área capaz de resistir a pelo menos 15% do momento máximo do vão.

As disposições de amarração podem ser as mesmas que são consideradas nos pontos 9.2.1.3, .4 e .5.

O Eurocódigo não fornece áreas mínimas para as armaduras de canto a definir numa laje, apenas indica que no caso de existir impedimento do levantamento de um canto da laje as armaduras a instalar devem ser adequadas ao tipo de disposição construtiva.

Existe uma particularidade em relação às vigas que as lajes maciças possuem relativamente aos bordos livres. As disposições a aplicar a uma laje com bordo livre diferem das vigas no comprimento de amarração das armaduras longitudinais superiores e na necessidade de ter armaduras transversais dispostas da forma indicada seguidamente.

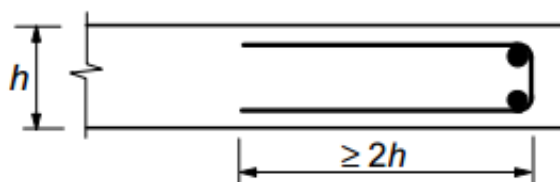


Figura 2.29 – Armaduras de bordo livre numa laje (Figura 9.8 do EC2)

Nestes casos as armaduras correntes utilizadas na laje podem desempenhar a função de armaduras de bordo livre.

Armaduras transversais

Em lajes maciças, como é óbvio, o uso de armaduras de esforço transverso só é adotado quando o esforço transverso atuante (V_{Ed}) é superior ao valor resistente ao esforço transverso de um elemento sem armadura de esforço transverso ($V_{Rd,c}$), ponto 6.2.1 (5). Também é indicado no ponto 6.2.1 (8) que para elementos sujeitos predominantemente a ações uniformemente distribuídas, não é necessário proceder à verificação do valor de cálculo do esforço transverso atuante até uma distância igual ao valor da altura útil da secção, contabilizada a partir da face de apoio do elemento. Na eventualidade de ser necessária a aplicação de tais armaduras, o EC2 procede à definição de regras elementares para a aplicação das mesmas em lajes. O ponto 9.3.2 do regulamento assinala que para ser possível aplicar uma armadura de esforço transverso a laje deverá ter no mínimo 20 cm de espessura e reverte ao ponto 9.2.2, relativo às armaduras de esforço transverso em vigas, para definição dos valores mínimos de armadura a aplicar. Em lajes existe ainda uma regra adicional que nos indica que se o V_{Ed} for inferior ou igual a um terço do esforço resistente máximo ($V_{Rd,max}$), a armadura de esforço transverso pode ser constituída, exclusivamente, por varões inclinados ou por cintas, estribos ou ganchos.

O espaçamento longitudinal máximo para armaduras de esforço transverso é o seguinte:

| | | | |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| | Cintas, estribos ou ganchos: | $s_{max} = 0,75d (1 + \cot \alpha)$ | (9.9) |
| 9.3.2 (4) | Varões inclinados: | $s_{max} = d$ | (9.10) |

O espaçamento transversal em armaduras de esforço transverso em lajes não deve ser nunca superior a $1,5d$.

2.2.1.1.4 Requisitos e Disposições para Pilares Betonados “In Situ”

Armaduras longitudinais

Nas generalidades de condições aplicáveis a pilares, as regras começam por estipular que o ponto 9.5 do EC2 se refere apenas a pilares cuja dimensão h é no máximo 4 vezes o valor da menor dimensão b .

Partindo desse pressuposto, o EC2 refere que o diâmetro mínimo dos varões da armadura longitudinal em pilares é de 10mm (vide Anexo Nacional).

A nível de requisitos de valor máximo e mínimo de armadura longitudinal em pilares, é dito o seguinte:

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------|---------|
| 9.5.2 (2) | $A_{s,min} = \frac{0,10 N_{Ed}}{f_{yd}} \geq 0,002 A_c$ | (9.12N) |
| | $A_{s,max} = 0,04 A_c$ | |
| 9.5.2 (3) | Zonas de emenda: | NOTA |
| | $A_{s,max} = 0,08 A_c$ | |

N_{Ed} Valor de cálculo do esforço normal de compressão

Nos pilares é ainda exigido, em secções poligonais, que seja colocado um varão longitudinal em cada ângulo. Já em pilares circulares o regulamento exige a aplicação de um mínimo de quatro varões.

Armaduras transversais

Para as armaduras transversais é exigido pelo EC2 diâmetros iguais ou superiores a um quarto do diâmetro máximo dos varões longitudinais, mas sempre com um mínimo de 6 mm de diâmetro. Caso se tratem de redes eletrosoldadas, o diâmetro mínimo passa a ser de 5 mm.

Estas armaduras devem ser devidamente amarradas e o espaçamento entre cintas não deverá exceder $s_{cl,max}$.

$$NA-9.5.3 (3) \quad s_{cl,max} \leq \begin{cases} 15\phi_l \\ b \\ 300 \text{ mm} \end{cases}$$

$s_{cl,max}$ Espaçamento máximo das armaduras transversais

ϕ_l Diâmetro máximo dos varões longitudinais instalados

b Menor dimensão do pilar

Existe ainda necessidade de reduzir para 60% o espaçamento entre armaduras transversais numa faixa com comprimento equivalente à largura da menor dimensão do pilar nas zonas de encontro do pilar com vigas ou lajes. Nas zonas de emenda por sobreposição é exigido, além da redução do espaçamento, em elementos com armadura longitudinal de diâmetro superior a 14 mm, que sejam colocadas 3 cintas igualmente espaçadas sobre o comprimento de sobreposição, ver ponto 9.5.3 (4) (ii) e 8.7.4.

O EC2 deixa ainda um aviso para as situações de mudança de direcção dos varões longitudinais. Em casos onde a secção do pilar seja variável ao longo do seu desenvolvimento, por exemplo, deve ser aplicada armadura transversal de acordo com os esforços transversos resultantes dessa mudança. É ainda referido que esta disposição pode ser ignorada desde que a mudança de direcção seja inferior à relação 1/12.

A última referência a disposições construtivas para pilares presente no EC2 é relativa ao travamento dos varões longitudinais. Varões de canto devem ser travados recorrendo às armaduras transversais e todos os varões interiores espaçados a mais 150 mm de um varão travado devem ser igualmente travados recorrendo a estribos, isto em zonas de compressão. As regras de amarração aplicáveis mantêm-se como sendo as já abordadas nos requisitos e disposições gerais.

2.2.1.1.5 Requisitos adicionais para nós de pórticos

Estas disposições são incluídas no anexo J do EC2 e são soluções de cintagem adicionais criadas para garantir o equilíbrio das forças transversais perpendiculares ao plano do nó.

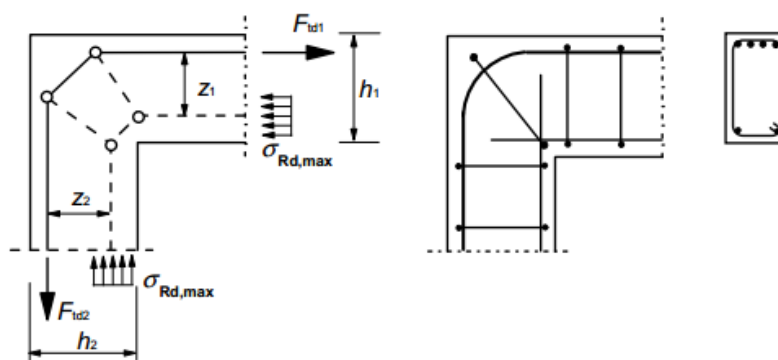
Nós com a face interior comprimida

Estas regras não são obrigatórias em nós de ligação de elementos onde a relação entre as dimensões h das vigas e dos pilares esteja dentro do seguinte intervalo:

$$J.2.2 (1) \quad \frac{2}{3} \leq \frac{h_2}{h_1} \leq \frac{3}{2}$$

h_2 Largura de face do pilar

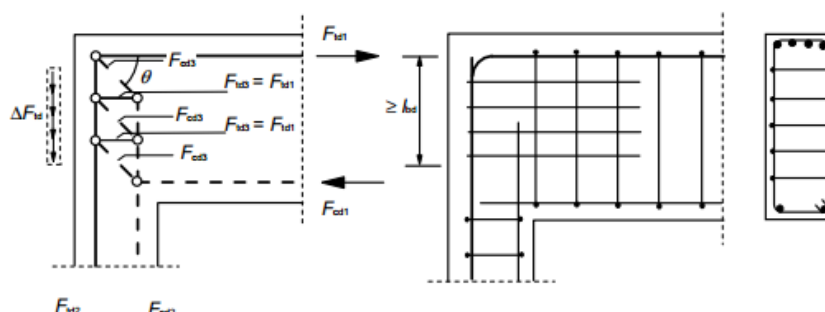
h_1 Largura de face da viga



(a) viga e pilar de dimensões aproximadamente iguais

Figura 2.30 – Nó com a face interior comprimida. Modelo de cálculo e armaduras (Figura J.2 do EC2)

Em situações onde a relação seja $h_2/h_1 < 2/3$, terá de ser estudada uma ligação por meio de um modelo de escoras e tirantes, e as cintas terão de ser dispostas ao longo de um comprimento de amarração l_{bd} .



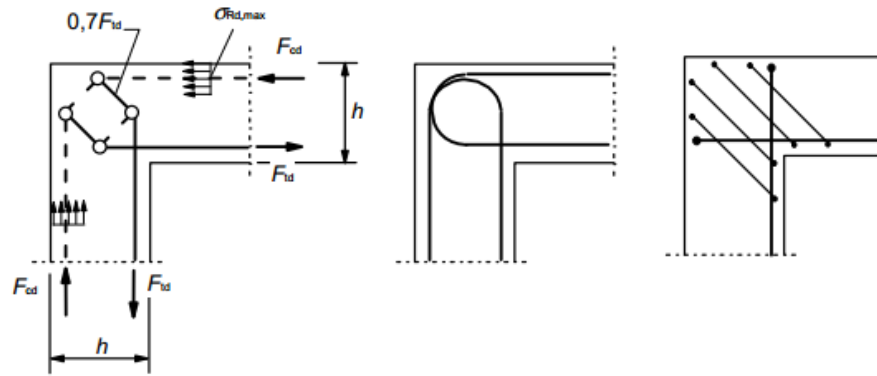
(b) viga e pilar de dimensões muito diferentes

Figura 2.31 – Nó com a face interior comprimida. Modelo de cálculo e armaduras (Figura J.2 do EC2)

Nós com a face interior tracionada

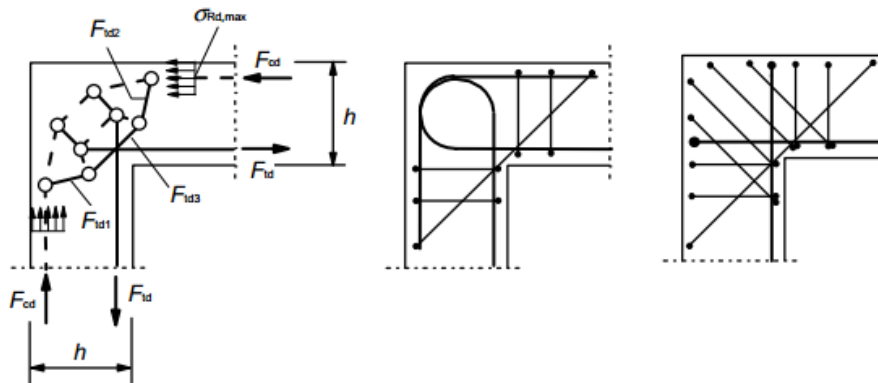
Em nós que estejam sujeitos a esforços de tração na zona da face de ligação interior o EC2 é ainda mais metódico e cria dois modelos de cálculo dos esforços considerando um modelo moderadamente tracionado e outro fortemente tracionado. As disposições são semelhantes em ambos os modelos, com a aplicação de varões sobrepostos dobrados em U e associação a cintas inclinadas.

O EC2 apresenta um modelo para cada situação, considerando as dimensões dos elementos ligados como aproximadamente iguais.



a) modelo de escoras e tirantes (b) e (c) pormenorização das armaduras

Figura 2.32 – Nó com a face interior moderadamente tracionada
(por exemplo, $A_s/bh \leq 2\%$) (Figura J.3 do EC2)



a) modelo de escoras e tirantes (b) e (c) pormenorização das armaduras

Figura 2.33 – Nó com a face interior fortemente tracionada
(por exemplo, $A_s/bh > 2\%$) (Figura J.3 do EC2)

2.2.2 Programas de análise e dimensionamento

Já foi referido na introdução à análise e dimensionamento estrutural que existem imensos programas de análise e dimensionamento estrutural. Surgem regularmente novos programas, alguns deles como *freeware* disponível para quem quiser experimentar.

A existência deste tipo de *software* é uma mais-valia para a profissão de engenheiro uma vez que além de agilizar o processo de cálculo também pode precaver a ocorrência de erros que ponham em causa o projeto, ou pelo menos as notas de cálculo podem ser mais completas e fáceis de interpretar numa situação de revisão de projeto. É claro que é necessário que quem procede ao cálculo estrutural esteja apto para a tarefa e possua as capacidades e conhecimentos requeridos para realizar o projeto e mesmo para criar o modelo de cálculo. É por isso necessária formação especializada tanto a nível académico como a nível de manuseamento de *software* para que se possa tirar o máximo partido deste tipo de ferramentas.

Uma vez que o número de programas de cálculo existente é extenso, a atenção deste relatório vai recair sobre alguns dos programas que são reconhecidos pela *Sturdy Structural* [38], página direcionada para a área de engenharia de estruturas, como alguns dos melhores no mercado de *software* de análise e dimensionamento estrutural. A informação prestada nos próximos pontos deste relatório, sobre os programas de análise, é retirada do artigo da página já referido e do cruzamento dessas informações com o que se encontra exposto na página das empresas responsáveis pelo desenvolvimento das marcas.

Os programas Robot Structural Analysis e PAC-Pórticos não surgem neste ponto uma vez que é feito um teste mais completo às suas capacidades no terceiro capítulo desta dissertação.

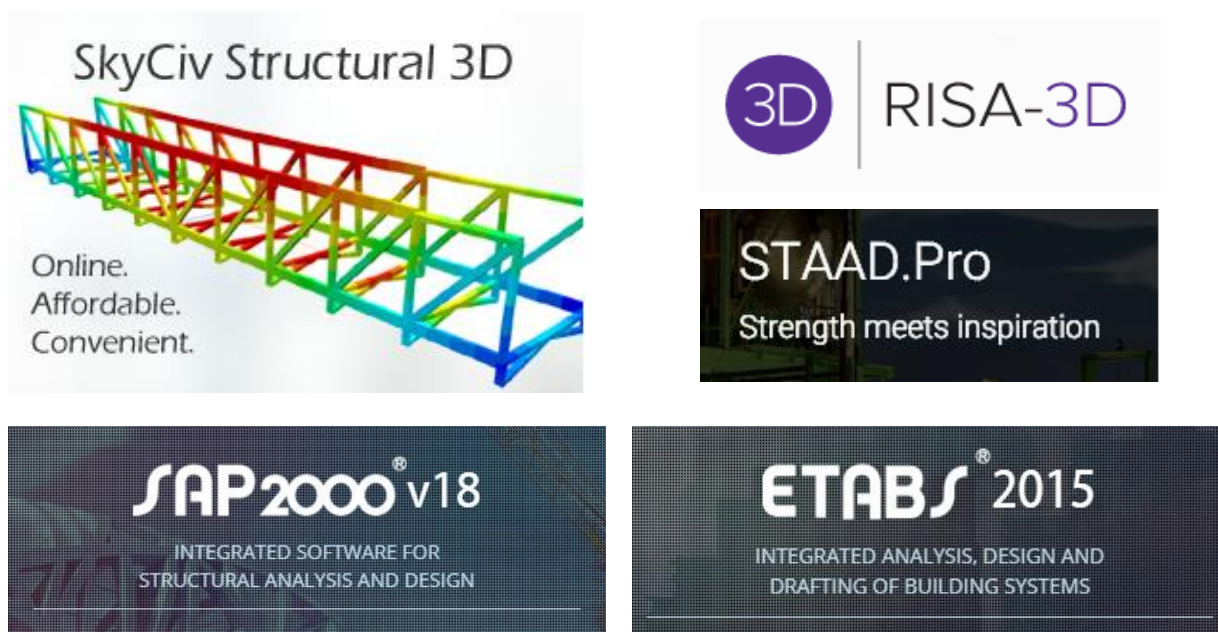
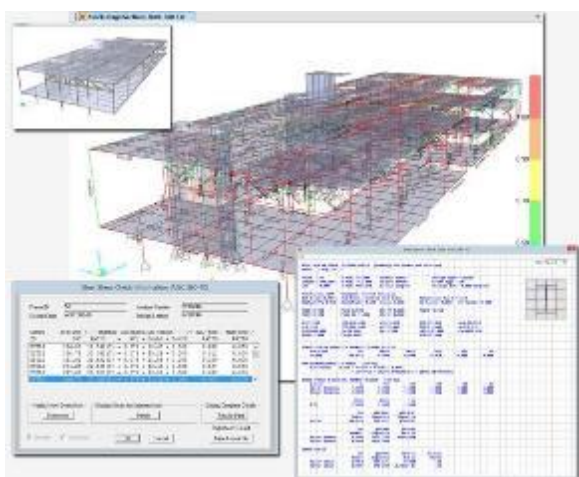


Figura 2.34 – Alguns dos programas de cálculo e análise estrutural mais solicitados

2.2.2.1 SAP2000

O SAP2000 é usado em mais de 160 países em todo o mundo, muito devido à sua eficácia e recursos de modelação com objetos 3D. Desde instalações industriais a obras públicas, é amplamente utilizado para análise estática de estruturas. Dispondo uma interface de utilizador sofisticada, intuitiva e versátil. Tem ainda a capacidade de fornecer modelos para estruturas complexas com base em *templates* próprios do programa e possui todas as ferramentas necessárias para uma modelação e análise rápida e intuitiva, assim como bibliotecas de secções e propriedades materiais. Consegue gerar automaticamente cargas associadas a vento, ondas, sismos e cargas dinâmicas em pontes, para dimensionamento automático de elementos de aço ou betão armado seguindo os códigos internacionais de dimensionamento, incluindo os Eurocódigos. Possui funções de apresentação de relatórios/notas de cálculo para possível análise dos procedimentos de cálculo executados pelo programa.

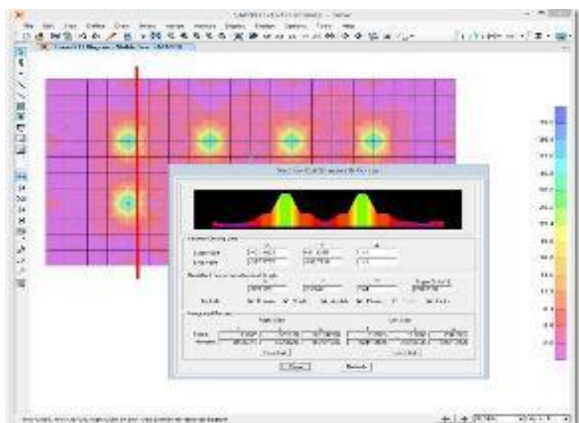
A versão atual do SAP2000, a v18, é capaz de realizar verificações de estabilidade para casos de carga não-lineares, bem como exportar modelos para o *Revit Structure*.



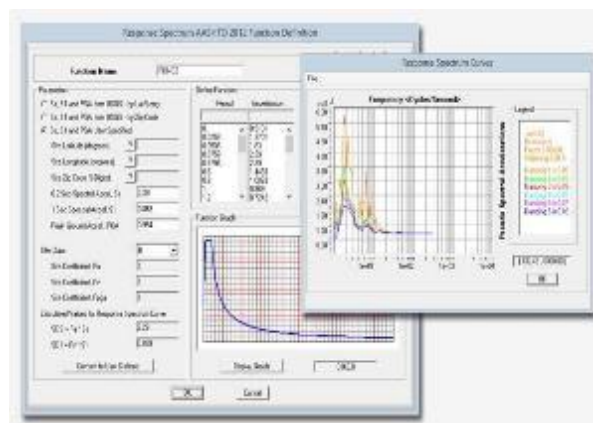
a) Dimensionamento



b) Notas de cálculo



c) Análise estrutural



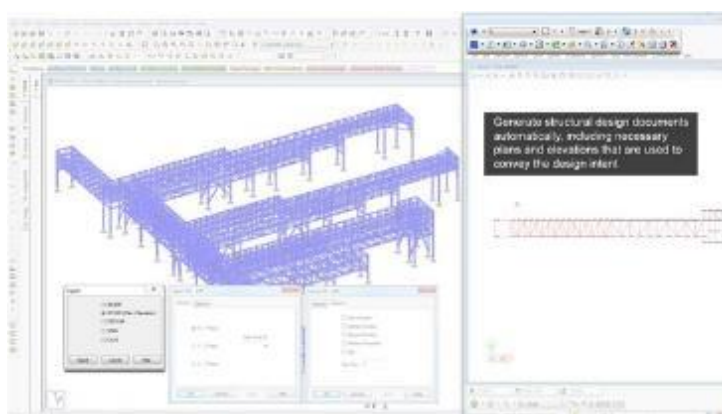
d) Análise dinâmica

Figura 2.35 – SAP2000

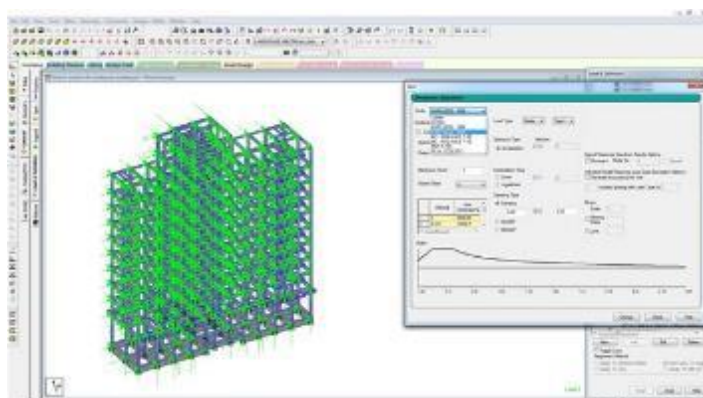
2.2.2.2 STAAD.Pro

O STAAD.Pro é utilizado tanto para a análise estática como para análise não-linear. É capaz de analisar efeitos dependentes do tempo, tais como fluência, retração e fissuração do betão. Outros programas desenvolvidos pela *Bentley*, empresa detentora do *software*, podem ser utilizados conjuntamente com o *software*. Os modelos criados podem ser importados para OpenSTAAD para serem de seguida transferidos para aplicações de terceiros. Os modelos STAAD.Pro também podem ser integrados com o ProjectWise, onde o *software* pode utilizar o modelo importado para colaboração e gestão do projeto. A sua interface permite importar modelos CAD.

É *user friendly* e intuitivo, a própria *Bentley* declarou que 80 por cento dos seus novos clientes podem aprender a operar o programa de forma eficiente em menos de duas horas. A *Bentley* também se gabou de que os seus programas podem projetar estruturas utilizando mais de 80 códigos internacionais e pode gerar documentos de projeto automaticamente. Este último feito não é algo novo, mas é relevante para projetistas de todo o mundo.



a) Dimensionamento e produção documental



b) Análise estrutural dinâmica

Figura 2.36 – STAAD.Pro

2.2.2.3 RISA-3D

Outro *software* de modelação e análise 3D de estruturas é o RISA-3D, capaz de modelar edifícios, estádios e complexos desportivos, estruturas industriais, pontes, entre outras. Pode ser integrado com outros produtos *RISA*, como o RISAFloor, RISAConnection ou RISAFoundation. Forças horizontais, sísmicas ou do vento, podem ser introduzidas no sistema de cálculo de esforços laterais da estrutura, e de seguida o modelo pode ser integrado com o programa RISAFloor para projetar cargas de gravidade e sobrecargas verticais. O RISA-3D faz a integração do RISAFoundation através da transferência de reações, das lajes e restantes elementos de suporte de carga, para as sapatas e fundações modeladas. A integração do RISAConnection permite projetar automaticamente as ligações para a estrutura no Risa-3D. Inclui capacidades de dimensionamento com base em regulamentos estruturais.

Um estudo de 2013 indicava este *software* como o mais utilizado por engenheiros dos Estados Unidos.

A interoperabilidade do programa é garantida fazendo uso do RISA><REVIT Link ou do RISA><TEKLA Link.

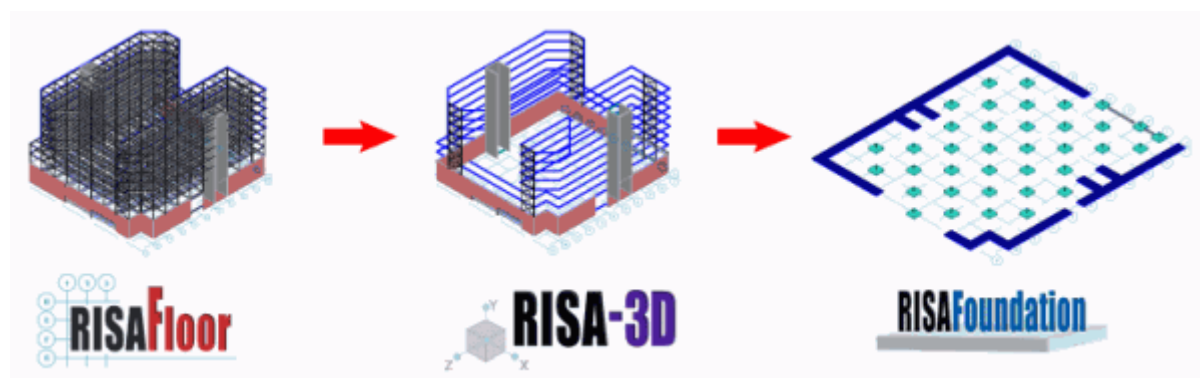


Figura 2.37 – RISA-3D e o procedimento de integração entre módulos de dimensionamento e análise

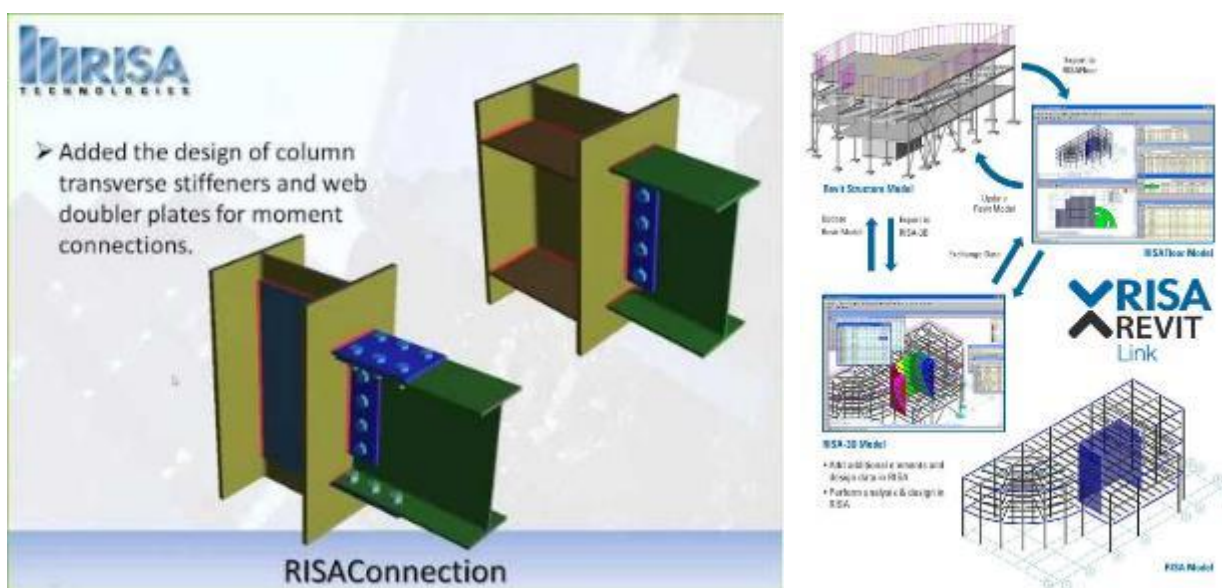


Figura 2.38 – Módulo RISAConnection e componente RISA><REVIT Link

2.2.2.4 ETABS

O ETABS 2015 é desenvolvido pela mesma empresa que criou o SAP2000, mas é utilizado para outros fins. Serve principalmente para projetar e analisar sistemas estruturais de edifícios altos. É usado em todo o mundo devido às suas características de modelação rápida e sistemas de enquadramento e análise de estruturas grandes e complexas. O ETABS 2015 tem uma interface integrada e independente de outros programas. Colunas, paredes, lajes, vigas, aberturas e outros elementos podem ser concebidos e analisados utilizando somente este *software*. A estrutura também pode ser alvo de *rendering* 3D dentro da interface do *software*. A nova versão do SAP2000 já o permite, mas versões anteriores do ETABS já eram capazes de analisar estruturas de forma não linear. Os utilizadores podem projetar e verificar a estabilidade das estruturas para casos de fluência, retração, e encurvadura em pilares. Também podem produzir um modelo não-linear 2D para analisar fenómenos de fissuração do betão e comportamento ao corte. O ETABS 2015 também tem outro recurso interessante, onde os utilizadores podem usar *templates* de modelos ETABS criados anteriormente para iniciar rapidamente novos modelos, bastando introduzir o espaçamento da grelha de modelação, o número de pisos, as secções de elementos e respetivas cargas. A vantagem deste *software* é que possui tudo o que o SAP2000 disponibiliza e ainda é acompanhado por novas e interessantes funcionalidades.

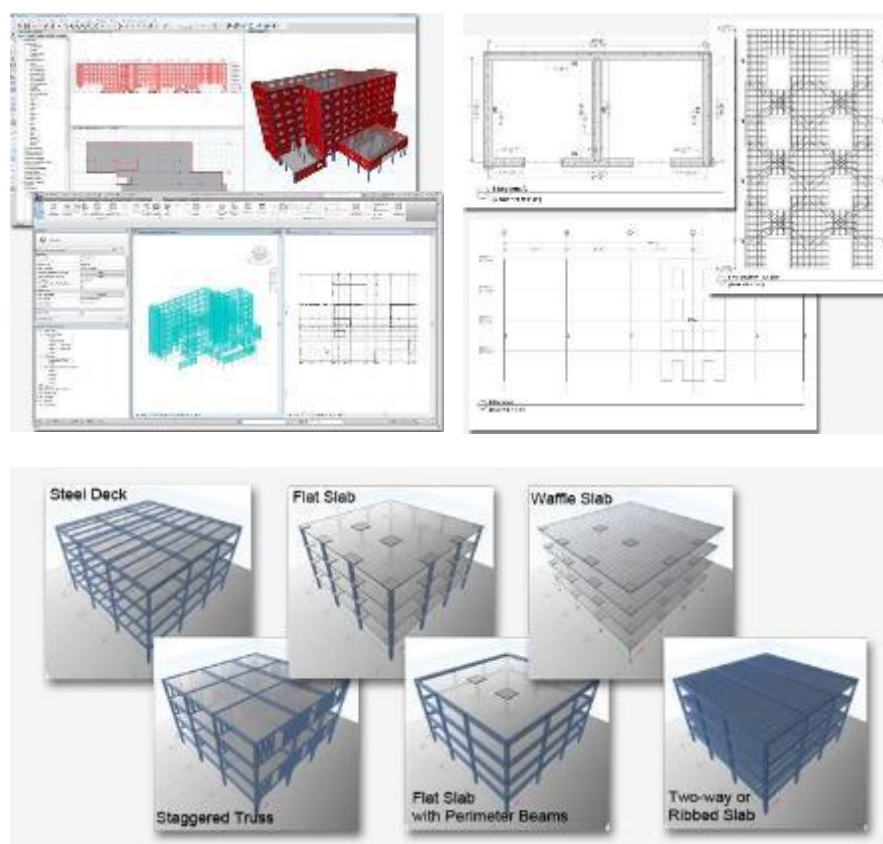
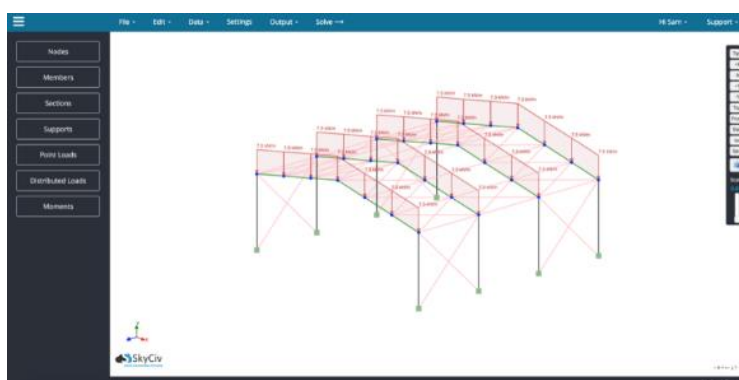


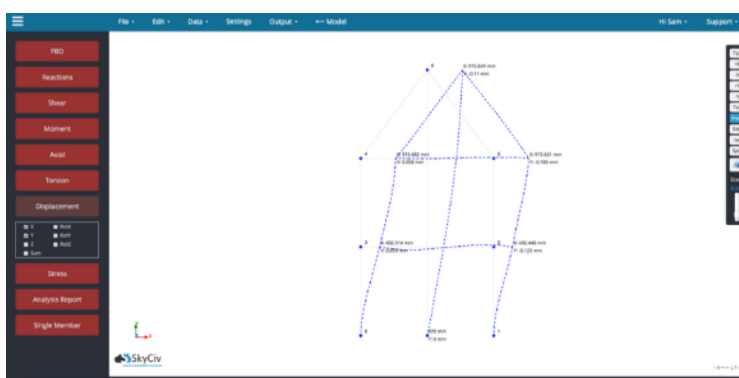
Figura 2.39 – ETABS 2015

2.2.2.5 SkyCiv Structural 3D

Este *software* é muito diferente dos quatro anteriores. Embora o SkyCiv seja também um *software* de análise estrutural, funciona *online*. Os modelos e toda a informação associada são armazenados *online* numa plataforma *cloud based* sem necessidade de instalação de componentes locais ou licenças de uso, proporcionando baixos custos de utilização e permitindo aos utilizadores trabalhar a qualquer hora e em qualquer lugar. O *software* tem as mesmas funções básicas que qualquer outro *software* de análise, com capacidades de análise à flexão, torção, axial, corte e deformação. Os utilizadores podem inserir cargas e condições de apoio, escolher ou definir quaisquer perfis estruturais, produzir relatórios da análise realizada e fazer um *rendering* 3D do modelo. O autor também oferece várias ferramentas *online* de apoio, para dimensionamento de treliças e vigas, por exemplo. No entanto o autor especificou que este *software* deve ser usado apenas para fins educacionais. Este *software* não é tão avançado como outros programas do género, uma vez que não pode produzir *layouts* de armadura e pormenorização. No entanto, este *software* é uma excelente ferramenta para obter um conceito rápido e geral do *design*, dos caminhos de carga e da análise de tensões em sistemas estruturais.



a) Modelação 3D e aplicação de cargas



b) Visualização de deformação da estrutura

Figura 2.40 – SkyCiv Structural 3D

2.3 MODELAÇÃO

A modelação de edifícios e de todas as suas componentes são o ponto forte do processo BIM uma vez que é através deste processo de modelação e inserção de informação no modelo que a filosofia de interoperabilidade e coordenação vai trabalhar.

Já existe muita oferta de programas com capacidades de modelação, como o SketchUp, o ArchiCAD ou mesmo o Revit que são alguns dos mais utilizados e mais bem classificados, a nível de *software* de modelação de edifícios, segundo a *G2 Crowd* [42], empresa especializada na análise e classificação de *software*.

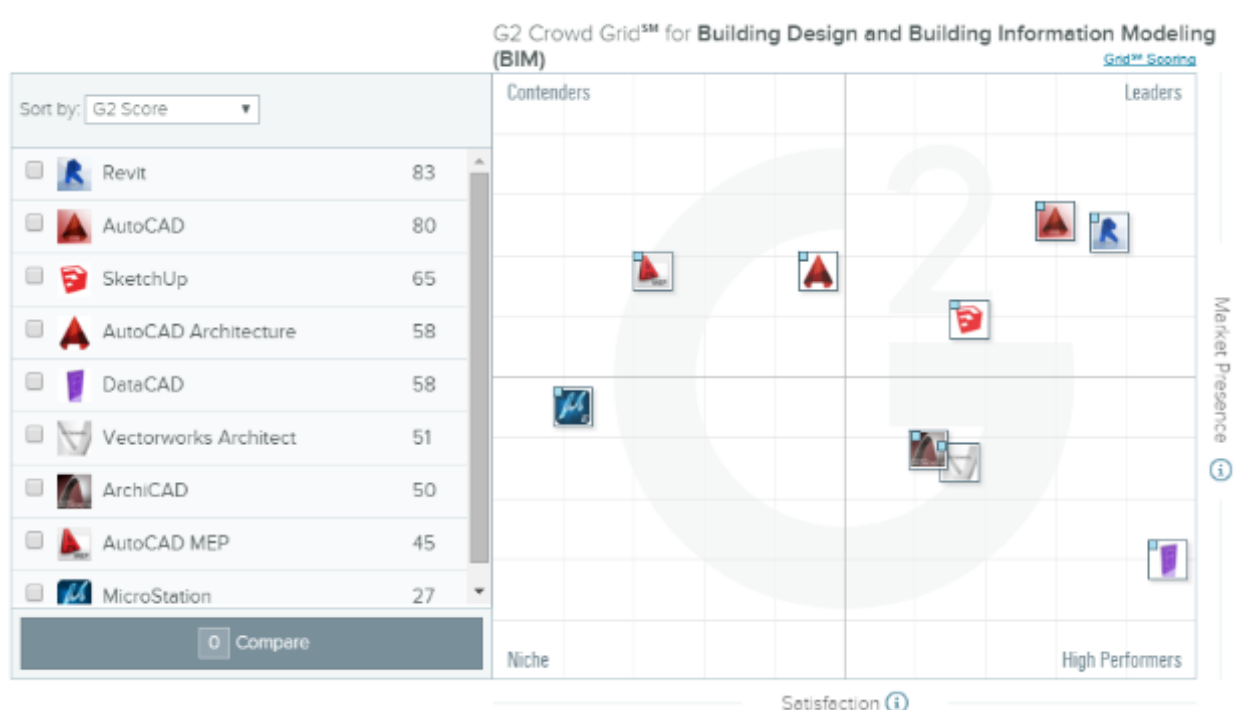


Figura 2.41 – Grelha de avaliação e comparação de *software* BIM (G2 Crowd)

Todos estes programas têm um forte desempenho na área de modelação de arquitetura e componentes de um edifício com a possibilidade de inclusão de informação específica sobre cada elemento modelado.

As capacidades de interoperabilidade de muitos deles são conseguidas através de elementos externos ao programa capazes de criar um formato de ficheiro que compatibiliza o modo como cada programa visualiza ou identifica um tipo de informação ou reconhece um dado elemento. Como já vimos, o RISA><REVIT Link, permite a partilha de dados entre o Revit e o RISA-3D.

Ainda assim, alguns destes programas são especializados na área de modelação de arquitetura e não tem capacidade de modelação de elementos de armadura interna em elementos de betão armado. Sendo assim, a nossa atenção irá focar-se nos tipos de *software* mais capazes e próprios para os objetivos definidos.

Os programas que são explorados mais aprofundadamente no capítulo 3, a nível de modelação de armaduras em elementos estruturais, são o Revit, Tekla Structures e o Advance Concrete. O *software* Robot Structural Analysis possui um módulo de dimensionamento com representação 3D que irá ser testado. Existem outros programas de dimensionamento, alguns dos quais já foram apresentados no ponto 2.2 deste relatório, que são capazes de realizar o dimensionamento de estruturas e possuem módulos para criação de modelos 3D de armaduras e de pormenorização das mesmas.

Segundo um artigo da página *civil + structural ENGINEER* [35], revista especializada em artigos sobre engenharia civil, os problemas habitualmente associados a este tipo de ferramentas estão relacionados com a complexidade de utilização de comandos de modelação e com as limitações de pormenorização e configuração dos varões de aço que se pretende introduzir. Estas limitações acabam por se traduzir em baixa produtividade, dada a baixa performance dos programas na reprodução de modelos 3D bem configurados. Por essas razões a utilização de ferramentas CAD para representação 2D de perfis tipo de vigas e outros elementos de betão armado são ainda muito usados na produção de documentos técnicos.

Hoje em dia já existe uma evolução destes programas e da sua capacidade para reprodução de milhares de varões e pormenores de montagem, alguns destes respeitando automaticamente as disposições construtivas regulamentares. Além desta capacidade de modelação, estes têm a capacidade de criar desenhos de forma facilitada, desde a definição da secção de corte, às cotagens e marcação de detalhes construtivos. A vantagem na produção de desenhos, as possibilidades de verificação de conflitos entre pontos de emenda, quantificação exata e listagem de materiais, assim como a produção de documentos para planeamento de obra são uma realidade e uma mais-valia para qualquer projeto. Estes modelos BIM também garantem uma agilização no processo de execução de uma alteração no projeto, pois ao realizar uma mudança no modelo 3D alteram-se automaticamente as peças desenhadas e qualquer outro documento gerado a partir do modelo.

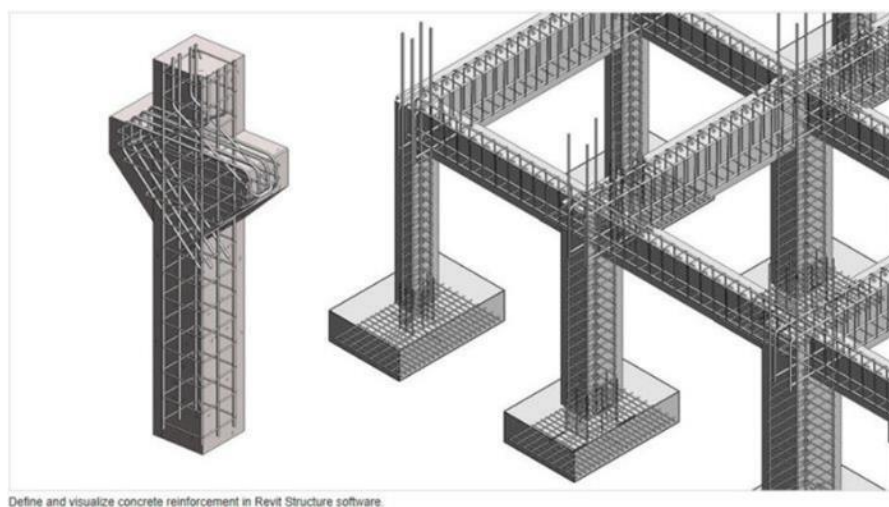


Figura 2.42 – Exemplo de armaduras BIM modeladas em Revit (Autodesk)

2.3.1 Programas de modelação BIM

Neste ponto são abordados programas, não abordados no capítulo sobre análise e dimensionamento, com capacidades de modelação interessantes dado o contexto de pormenorização de armaduras. São abordados quatro programas, sendo dois destes versões *standalone* e os outros dois ferramentas criadas para apoio ao *software* base, um deles para o Revit, e que adicionam um conjunto de comandos que permitem a criação facilitada, pormenorização e planeamento de armaduras de betão armado. A informação presente é a que é disponibilizada pelos criadores das aplicações nas páginas referentes aos produtos em causa.



Figura 2.43 – *Software* para modelação e pormenorização de armaduras

A existência de ferramentas como o ProRebar e o POWERPACK são as soluções mais habituais no que respeita a *software* específico para modelação. Esta razão deve-se ao facto de a maioria das empresas de desenvolvimento de *software* de análise e dimensionamento estrutural procurar cada vez mais integrar este tipo de ferramentas no próprio programa de dimensionamento. A razão para isso poderá estar na necessidade de aplicar diretamente os regulamentos e normas de dimensionamento exigidas e garantir que um só *software* tem a capacidade de aplicar essas condições sem a necessidade de recorrer a múltiplas ferramentas. O uso de elementos externos ou só direccionados para a modelação tem como principal interesse a possibilidade de corrigir ou adaptar qualquer limitação que o programa de dimensionamento possa ter.

2.3.1.1 Autodesk Advance Concrete

O Advance Concrete é um programa construído sobre a plataforma AutoCAD. A Autodesk não o esconde e o acesso ao *software* indica isso mesmo, uma vez que abre a versão do AutoCAD que estiver instalada primeiro e só depois abre os comandos específicos do módulo. É uma versão mais avançada do AutoCAD focada em projetos de modelação e pormenorização de peças de betão armado. Permite uma modelação mais rápida e precisa, gera desenhos técnicos de construção e quantifica materiais de forma quase automática. É interoperável com o software Revit criando um fluxo de trabalho BIM. Dada a necessidade de recorrer ao *software* Revit a exploração é feita de um modo mais simples. É feita a comparação entre as capacidades deste com as restantes ferramentas de modelação testadas. Além das ferramentas especializadas do programa as capacidades de modelação são expandidas com as vastas bibliotecas de materiais, secções e elementos estruturais. Tem capacidade de guardar *templates* de projetos anteriores de forma a facilitar a criação de novos projetos semelhantes recorrendo à alteração de algumas dimensões e pequenos detalhes.

Apesar de ser baseado na plataforma AutoCAD a modelação 3D é facilitada por novos comandos. O processo de criação e pormenorização de armaduras é feito em planos 2D dos elementos estruturais, mas o programa, à semelhança do Revit, cria automaticamente a versão 3D da armadura. A base de criação dos modelos assenta numa modelação paramétrica definida a partir do posicionamento geométrico das peças onde se pretende colocar os novos elementos de aço. Também tem capacidade para verificar conflitos entre as diversas armaduras e possui comandos para modelação automática de malhas de armadura em lajes e paredes.

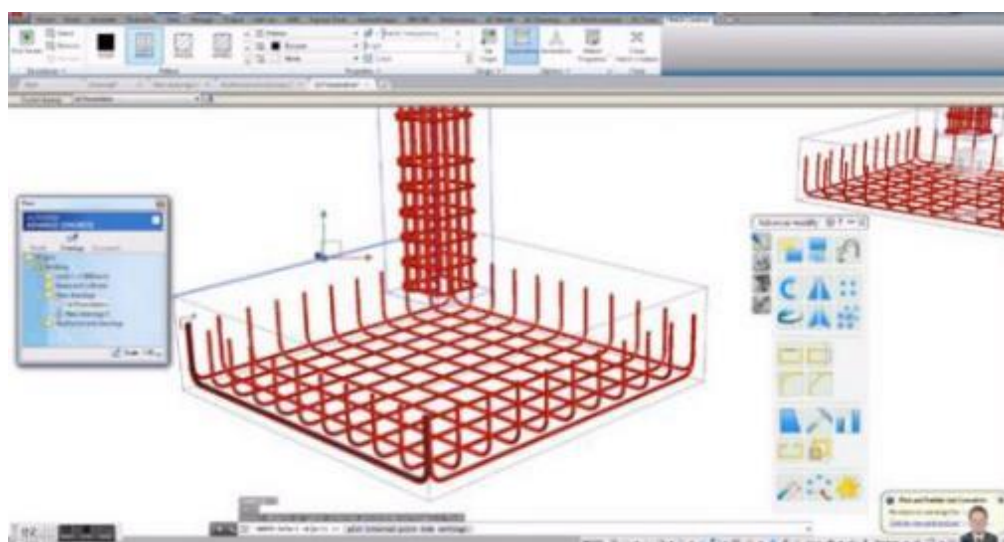


Figura 2.44 – Advance Concrete, interface e exemplo de modelação de sapatas (*Construction Cost*)

2.3.1.2 ProConcrete

Com o *software* ProConcrete é possível modelar betão armado com qualquer tipo de armadura e/ou combinação possível. Os elementos, tal como no programa anterior, são modelados como objetos 3D paramétricos. É possível criar rapidamente desenhos de montagem para obra, detalhes de fabricação, planos de dobragem de varões e relatórios de quantidade de materiais a partir do modelo 3D, que se atualizam automaticamente para refletir as alterações feitas ao longo projeto no modelo. As ferramentas de modelação 3D avançadas, para pormenorização e planeamento de armadura *"in situ"*/pré-fabricado e estruturas de betão pós-tensionadas, reduzem o tempo de produção de documentação, erros e falhas de projeto. Permite modelar de forma eficiente qualquer secção de betão armado com 100% de precisão e com detalhe equivalente a um modelo *"as-built"*. Facilmente troca informações com outros programas e entrega rapidamente propostas detalhadas e personalizadas das soluções criadas. Possui bibliotecas com especificações técnicas e padrões internacionais de produtos e elementos de armaduras.

A nível de informação de apresentação, este *software* é muito semelhante ao Advance Concrete, já que algumas das ferramentas de planeamento para elementos *"in situ"*/pré-fabricados são igualmente disponibilizadas. A diferença está na plataforma de uso, apesar de poderem ser ambos considerados como elementos *standalone* (apesar de o Advance Concrete necessitar do AutoCAD, este é anunciado pela Autodesk como um *software* independente), o ProConcrete tem a vantagem de ser criado sobre uma plataforma própria inteiramente dedicada à modelação de elementos de betão armado.

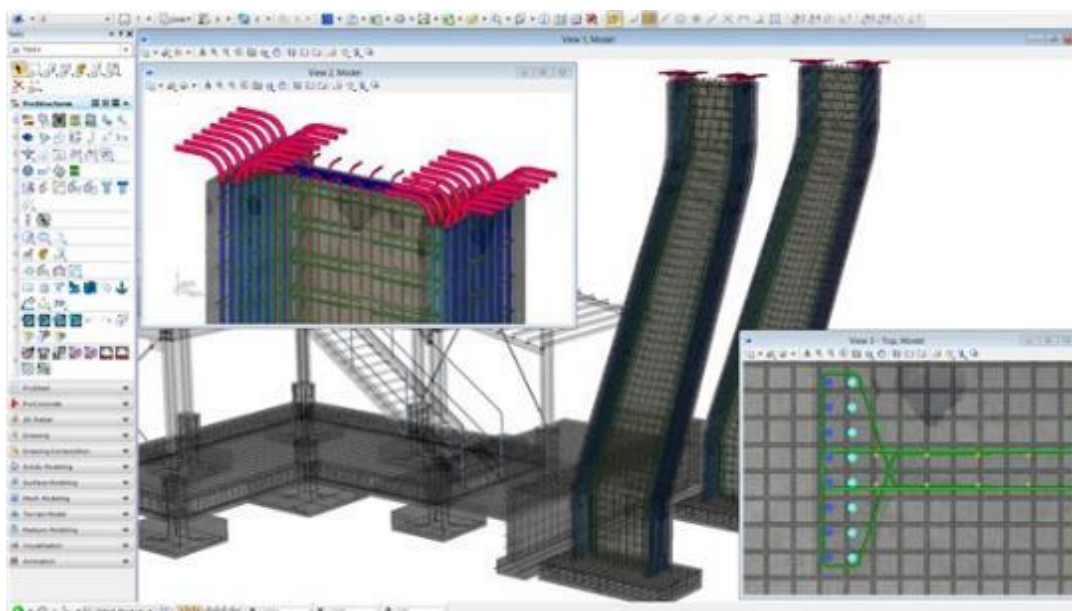


Figura 2.45 – ProConcrete, interface e exemplo de modelação de armaduras

2.3.1.3 ProRebar

O ProRebar é uma ferramenta de *software* CAD 3D utilizada para modelar, pormenorizar e planear a execução de estruturas de betão armado. Além de melhorar o avanço do projeto ao longo do tempo, o programa permite visualizar os elementos de betão e os respetivos varões de aço modelados sob uma perspetiva de projeto BIM.

O ProRebar é um elemento adicional ao motor de modelação do ProConcrete, com ferramentas especiais projetadas para fabricantes de varões e empresas de montagem, rápido e preciso a modelar todos os componentes de uma estrutura, incluindo betão, varões, malhas, conectores e outros acessórios. O sistema processa elementos betonados “*in situ*” e pré-fabricados. O ProRebar fornece uma ligação entre o banco de dados do modelo 3D e uma biblioteca de materiais *aSa*, empresa responsável pelo desenvolvimento da ferramenta.

A partir de um único modelo ProRebar, é possível gerar automaticamente desenhos 2D, mapas para dobragem de varões e mapas de quantidades. Alterações ao modelo 3D são automaticamente impostas a todos os desenhos e documentos relacionados. Mesmo formas complexas podem ser facilmente reforçadas através do conjunto de ferramentas disponibilizadas pelo *software* que permite detetar conflitos entre malhas e elementos de armaduras aplicados.

Através do programa base, ProConcrete, o ProRebar permite a partilha de dados do modelo com outras ferramentas 3D, como o Revit ou o STAAD.Pro.

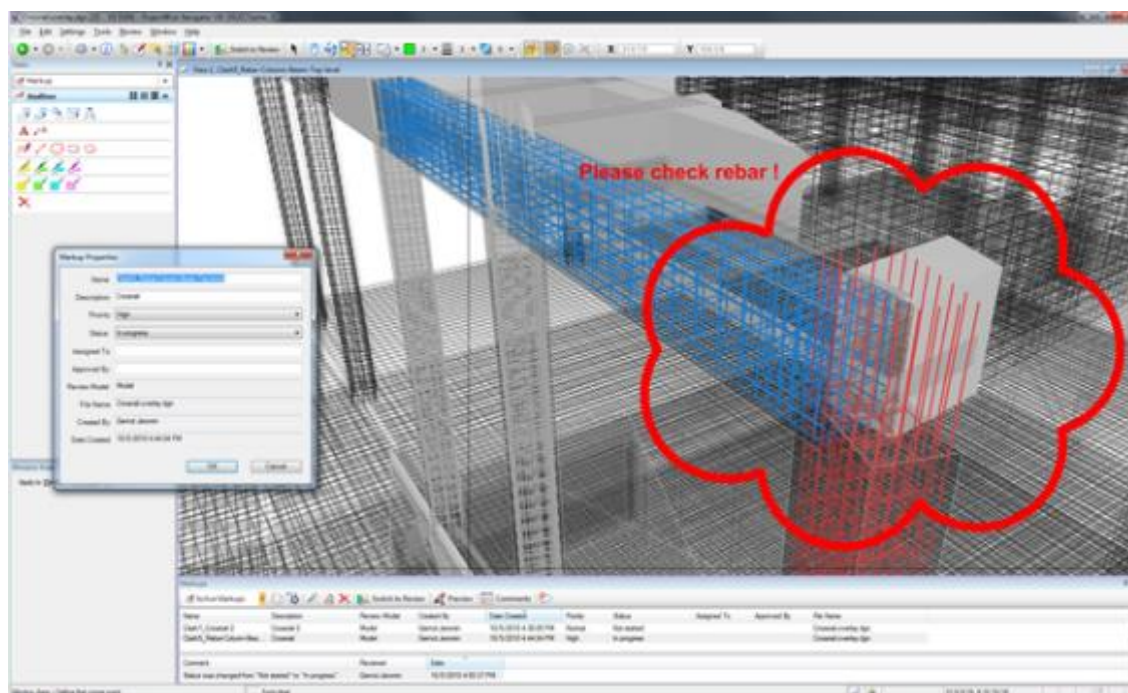
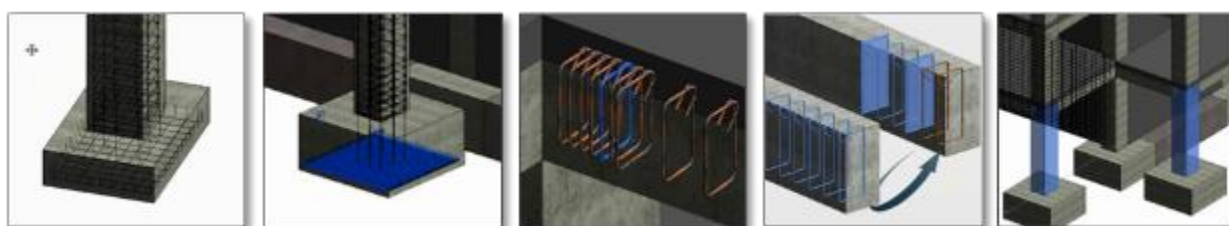


Figura 2.46 – ProRebar, interface e exemplo de detecção de conflitos

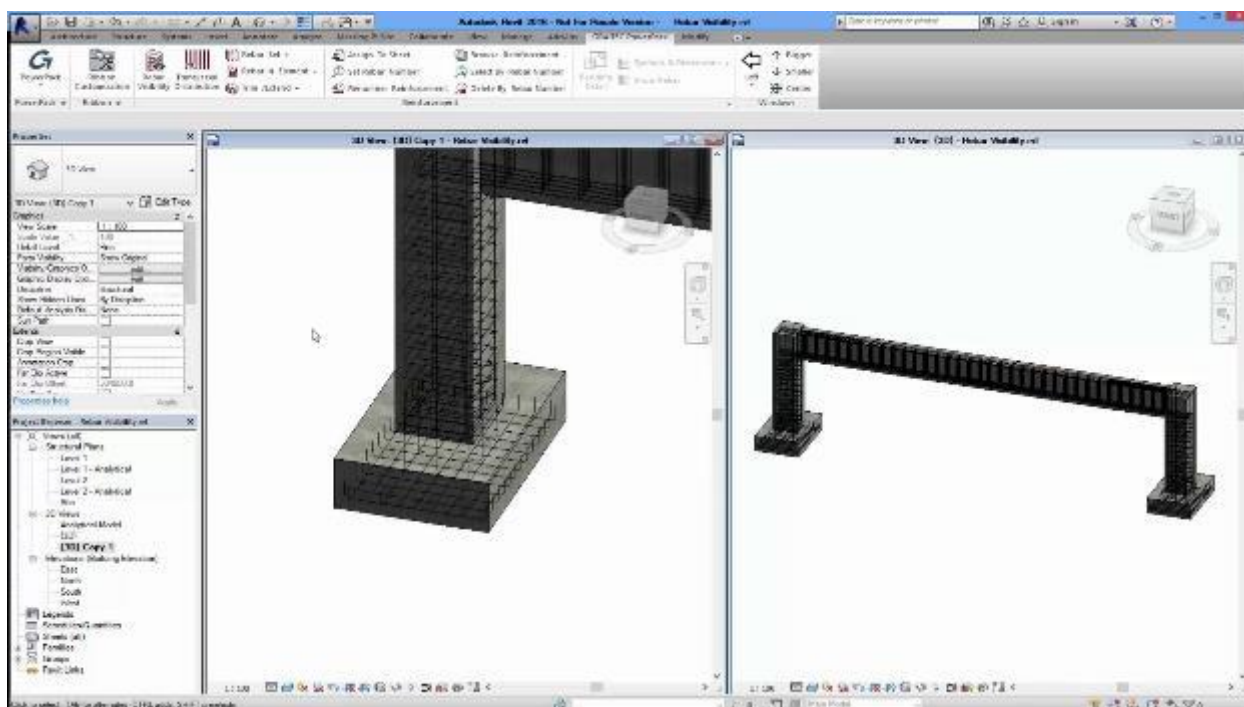
2.3.1.4 PowerPack

O PowerPack, o segundo *add-in* que é aqui destacado, fornece um amplo conjunto de comandos e funcionalidades únicas para aumentar significativamente a produtividade quando utilizado conjuntamente com o Revit. Estas ferramentas práticas e funcionais foram desenvolvidas para acelerar a modelação, simplificar a gestão de “famílias” – denominação utilizada pelo Revit para descrever a associação entre elementos do mesmo tipo –, predefinir anotações e criar *links* de dados externos para um fluxo de trabalho BIM melhorado.

Para dar maior controlo e automação aos utilizadores Revit de todos os setores, este inovador *add-in* corre sobre as plataformas Revit Architecture, Structure e MEP.



a) Exemplos de modelação em vigas e pilares



b) Interface e aplicação do *add-in* em pórticos

Figura 2.47 – PowerPack

2.3.2 Formatos de Partilha de Dados

Já foi abordada a temática da interoperabilidade e o formato de ficheiro IFC, no ponto 2.1.2, enquanto formato com capacidade para armazenamento e partilha de informação, mas este não é o único tipo de ficheiro utilizado para partilha de dados. A *evolveconsultancy* [31] chega a referir num dos seus artigos que o formato IFC é um método pouco preciso de troca de arquivos BIM e dados. As interpretações do esquema IFC, os resultados, incluindo a localização de coordenadas do modelo IFC, podem ser diferentes aquando da importação de um ficheiro IFC para um *software* diferente.

O modelo IFC contém ainda outra particularidade no que toca à informação contida no ficheiro. O formato IFC não tem capacidade para distinguir entre elementos de uma mesma classe, ou seja, ele identifica um elemento do tipo parede como sendo uma parede, mas não distingue se esta é de alvenaria dupla, simples ou em betão armado, entre outras limitações a nível de identificação de componentes. Apesar dessas limitações o formato é capaz de armazenar informações relativas a dados analíticos ou de desempenho no interior dos objetos numa estrutura coerente, o que acaba por ser uma vantagem providenciada pelo modelo, apesar do seu método de classificação de objetos mais básico.

Por isso existe a necessidade de utilizar em conjunto com o formato IFC outros formatos capazes de preservar algumas informações mais específicas sem que estas sejam erroneamente interpretadas na transição entre diferentes ferramentas BIM.



Figura 2.48 – Formatos de interoperabilidade (Marco Almeida)

Como é possível ver pela figura 2.48 o número de formatos é vasto e não é possível abordar todos estes formatos neste relatório pelo que serão analisados apenas cinco destes formatos.

2.3.2.1 IFC

Relativamente a este formato já foi facultada bastante informação acerca das suas capacidades em pontos anteriores deste relatório pelo que nesta descrição ao formato serão abordados os diferentes formatos do tipo IFC, disponibilizados pela *BuildingSMART*, e os seus propósitos.

- .ifc – arquivo de dados IFC usado para definição da estrutura do ficheiro de acordo com a ISO 10303-21. Este é o formato de troca IFC padrão mais utilizado, compacto e adequado para incluir regras de validação de dados dentro das especificações do ficheiro.
- .ifcXML – arquivo de dados do IFC com estrutura em formato XML. Pode ser gerado diretamente em *software* de base XML, ou a partir de um ficheiro de dados IFC convertido segundo a ISO 10303-28. Um arquivo deste tipo é normalmente 3 a 4 vezes maior que um arquivo .ifc. É um formato adequado para troca parcial de modelos BIM.
- .ifcZIP – arquivo de dados IFC que recorre a um algoritmo de compressão (compatível, por exemplo, com pastas compactadas do Windows, WinZip, zlib, info-zip, etc.). Requer a existência de um ficheiro .ifc ou .ifcXML como documento principal do arquivo zip. Um arquivo .ifcZIP geralmente comprime um ficheiro .ifc em cerca de 60 a 80% e um arquivo .ifcXML entre 90 a 95%.

A *wikipédia* informa que o formato XML ou *Extensible Markup Language* é uma linguagem de marcação que define um conjunto de regras para documentos de codificação num formato que é legível tanto por seres humanos como por máquinas, definido pelas especificações da W3C XML 1.0 e por outras especificações relacionadas.

Os objetivos do formato XML centram-se no destaque da simplicidade, generalidade e funcionalidade do ficheiro pela Internet. É um formato de dados textual com forte apoio de diferentes tipos de linguagem. Embora o desígnio do XML se concentre em documentos, é amplamente utilizado para a representação de estruturas de dados arbitrárias, como as utilizadas em serviços da web.



Figura 2.49 – Logótipo IFC

2.3.2.2 BCF

Através das descrições dadas pela *Designing Buildings* [48], página apoiada pela ICE, Instituição de Engenheiros Cívicos Britânica, e pela *[Open]BIMer* [37], uma página dedicada à redação de artigos ligados ao BIM, chegamos à conclusão que o *BIM Format Collaboration* (BCF) é um formato de ficheiro aberto baseado em XML que permite a adição de comentários num modelo BIM IFC, um formato de dados neutro, do tipo *open data* utilizado para a partilha e troca de dados BIM em diferentes programas.

O formato BCF destina-se a simplificar a colaboração entre os diferentes grupos de trabalho que intervêm num modelo, permitindo-lhes levantar questões, dar respostas e fazer comentários dentro de um formato de ficheiro aberto que não contém elementos do modelo propriamente dito. Isto é, proporciona uma capacidade de comunicação separada do modelo. As questões e comentários, que podem ser enriquecidos por *screen-shots*, estão diretamente ligados aos elementos modelados e identificados com *Global Unique IDs* (GUIDs).

Os GUIDs são números de referência únicos usados como um identificador de elementos num *software*. O termo GUID refere-se às várias implementações do *Universally Unique Identifier* (UUID). Os UUIDs são o formato de identificação padrão utilizado no desenvolvimento deste *software*. A intenção deste identificador é permitir que os sistemas consigam identificar informação sem coordenação central significativa. Como os valores de identificação são de composição finita, existe a possibilidade de dois elementos partilharem o mesmo número de identificação. O que a página da *wikipédia* sobre este identificador nos diz é que no contexto de identificação de um elemento a sua referência deve ser tida em conta como "praticamente única" em vez de "garantidamente única"

Muito do *software* BIM comumente utilizado inclui a capacidade de reconhecer e criar ficheiros BCF.

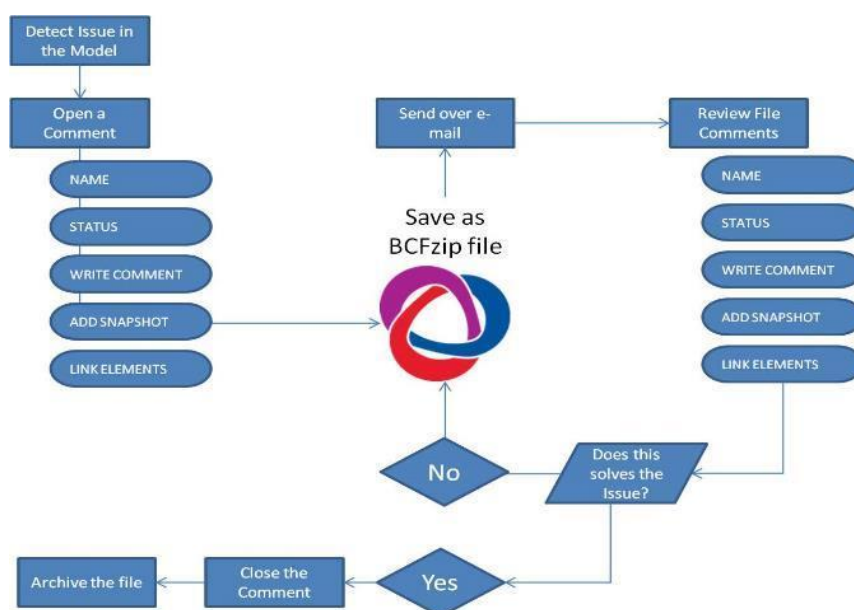


Figura 2.50 – Logotipo BCF e exemplo hipotético de aplicação do ficheiro ([open]BIMer)

2.3.2.3 COBie

COBie ou *Construction Operations Building information exchange* é um formato que se destina ao ciclo de vida completo de um projeto. O ficheiro é composto por uma folha de cálculo de Excel com todos os dados do projeto. Ter os dados num formato acessível e quase universal fornece grandes vantagens, pois permite que os dados sejam partilhados, independentemente do *software*, complexidade tecnológica ou do tamanho do projeto.

É dito pela *evolveconsultancy* [31] que, apesar do formato não incluir nos dados nenhum elemento gráfico, produzir um arquivo COBie pode ser um desafio. Grande parte da informação contida num modelo é do tipo não gráfico o que implica folhas Excel incrivelmente extensas, mas ignorando esse facto, o ficheiro COBie obriga ainda ao uso de uma terminologia específica. Listar nomes de objetos e mapeá-los de forma a serem algo compreensível para ser feita a importação dos dados por outro *software* pode revelar-se difícil. Segundo *Marco Almeida* [11], muitos projetistas chegam a questionar a necessidade de produzir este tipo de ficheiro, uma vez que o formato IFC é capaz de produzir informação não geométrica semelhante. Algumas empresas que desenvolvem ferramentas BIM já estão a criar *software* para conversão de dados em modelos COBie. Há um *kit* de ferramentas para Revit que auxilia os utilizadores com a produção de ficheiros COBie e a *Bentley* está a desenvolver um exportador, entre outros que procuram criar soluções de produção de ficheiros do tipo COBie. Como se trata de um formato baseado em Excel, tudo o que é preciso é alguém versado em linguagem de programação para ser capaz de tirar proveito dos dados contidos no ficheiro. A descrição deste formato segundo o *wikipédia* refere que este ajuda a recolher e gravar dados importantes do projeto no ponto de origem, incluindo listas de equipamentos, folhas de dados do produto, garantias, listas de peças de reposição, e o planeamento das ações de manutenção preventiva, assim como informação essencial no apoio às operações de manutenção e gestão de ativos quando o empreendimento construído estiver em serviço.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|-------------------|---------------------|---------------|----------------|-------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|---|
| | Name | CreatedBy | CreatedOn | TypeName | Space | Description | ExtObject | ExtIdentifier | |
| 2 | Bath/Shower-1 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Bath/Shower | B204 | M. Bath Tub:1525 mmx760 mm - Private:1525 mmx760 mm - Private:582931 | A IfcFlowTerminal | 2h405XjT83A58X7w5ki4b | |
| 3 | Bath/Shower-2 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Bath/Shower | A204 | M. Bath Tub:1525 mmx760 mm - Private:1525 mmx760 mm - Private:582924 | A IfcFlowTerminal | 1YLPoi73z0fvdanmaXQreg | |
| 4 | Boiler-1 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Boiler | B205 | M. Hot Water Boiler - 59-440 kW:147 kW:147 kW:557516 | A IfcEnergyConversionDevice | 1jQu9wkdr0lWNum13fISl | |
| 5 | Boiler-2 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Boiler | A205 | M. Hot Water Boiler - 59-440 kW:147 kW:147 kW:530072 | A IfcEnergyConversionDevice | 12pBelQPb2z91uXg6Q1dzc | |
| 6 | Cabinet Type A-1 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:159159 | A IfcFurnishingElement | 0wkEuT1wr1kOyafY4vyvM | |
| 7 | Cabinet Type A-10 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162487 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 8 | Cabinet Type A-11 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162488 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 9 | Cabinet Type A-12 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162489 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 10 | Cabinet Type A-13 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162493 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 11 | Cabinet Type A-14 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162495 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 12 | Cabinet Type A-15 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162496 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 13 | Cabinet Type A-16 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162497 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 14 | Cabinet Type A-2 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:159262 | A IfcFurnishingElement | 0wkEuT1wr1kOyafY4vyvM | |
| 15 | Cabinet Type A-3 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:160671 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 16 | Cabinet Type A-4 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:160717 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 17 | Cabinet Type A-5 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162230 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 18 | Cabinet Type A-6 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162311 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 19 | Cabinet Type A-7 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162357 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 20 | Cabinet Type A-8 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | B103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162383 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |
| 21 | Cabinet Type A-9 | mariangelica.carras | 2011-09-27T16 | Cabinet Type A | A103 | M. Base Cabinet-Double Door & 2 Drawer:1000mm:1000mm:162486 | A IfcFurnishingElement | 20Brcmyk58NupXoVOHUv | |

Figura 2.51 – Exemplo de ficheiro COBie

2.3.2.4 DWG

O formato DWG é o formato disponibilizado pela *Autodesk* para partilha de dados gráficos 2D ou 3D. Contém todas as informações inseridas em projetos como dados geométricos, mapas e fotos. É dos formatos mais utilizados em projeto e foi criado pela empresa para ser usado com o *software* AutoCAD.

A *evolveconsultancy* [31] caracteriza o DWG como um formato aceitável para a troca de dados de BIM, descrevendo como principal vantagem, além da ampla utilização, a sua capacidade para conservação da geometria, mesmo quando convertido para outro formato, como DNG. A maioria do *software* com capacidades CAD tem a possibilidade de importar e exportar este formato. O formato DNG é um modelo de ficheiro semelhante ao DWG mas concebido pela *Adobe*. Apesar de menos utilizado este formato começa a ganhar relevância devido a sua maior robustez na transição de informação.

Em termos de dados, tanto o DNG como o DWG são apoiados por *Hyperlinks*, o que significa que dados adicionais podem ser ligados ao modelo e mantidos mesmo após a conversão dos dados. Os *Hyperlinks* não adicionam dados diretamente ao objeto e permitem que os modelos permaneçam leves, facilitando a gestão dos dados de forma externa e sem necessidade de recorrer a uma ferramenta BIM com custos adicionais. É possível atribuir anotações e outras condições a elementos do projeto criando um modo mais eficiente de agrupamento de informação num dado elemento. Informação que pode ser facilmente exportada para Excel.

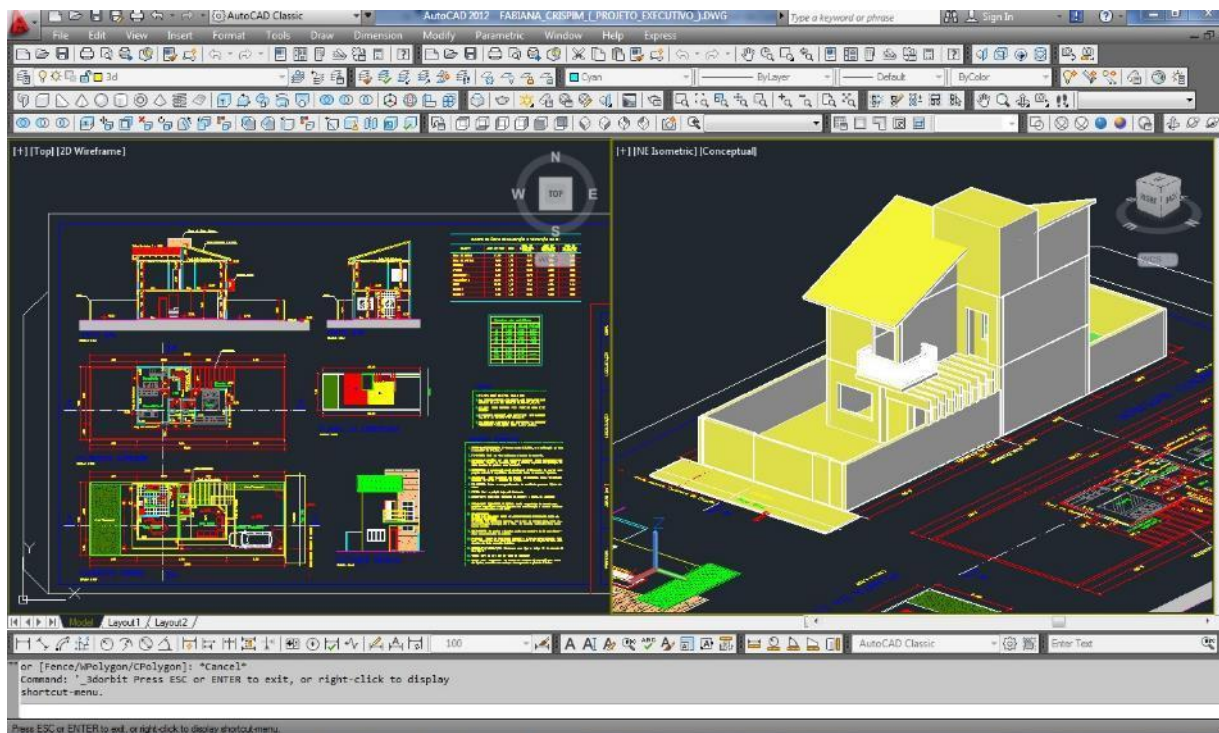


Figura 2.52 – Exemplo de modelação/criação em formato DWG no AutoCAD (Lúcia Paixão)

2.3.2.5 RVT

O formato RVT, tal como o DWG, é da autoria da *Autodesk*, mas foi concebido para o *software* Revit e todos as ferramentas derivadas desse produto. Só funciona sobre uma plataforma Revit e o ficheiro em si funciona como um banco de dados, ao invés de um ficheiro tradicional que normalmente contém componentes de um elemento ou piso, este formato tem capacidade para armazenar um projeto inteiro. Como já foi referido, o ficheiro RVT é utilizado na passagem de dados entre os programas Revit (*Architecture*, *Structure* e *MEP*), estes dados permanecem sempre no formato em que foram criados, com gráficos completos e sem comprometer a integridade dos dados. Sendo um banco de dados, os objetos podem ser geridos de forma muito flexível. O Revit familiariza os utilizadores com o conceito de *Worksets*, o método que possibilita a transformação de um modelo RVT em repartições divididas entre equipas de projeto. A coordenação da informação de retorno é que pode ser algo mais complexo.

Não há, atualmente, nenhum *software*, externo aos produtos Revit, capaz de importar ficheiros RVT. A *Autodesk* mantém o uso do formato restringido. A *evolveconsultancy* [31] entende esta manobra como uma estratégia de negócios, investindo a *Autodesk* na promoção do produto e aliciando novos clientes à aquisição do *software*. Isto pode ser entendido como um plano para obrigar os clientes à integração total do projeto sob produtos *Autodesk* o que acaba por ser, de certo modo, contraditório à metodologia BIM pois obriga à conversão do formato sempre que é necessário recorrer ao uso de *software* externo à marca e mesmo em casos de uso de outro *software* da *Autodesk*, de que é exemplo o AutoCAD. Algumas das conversões do formato RVT para outro *software* são realizadas através de intermediários, como já foi visto na passagem de um modelo RISA-3D para Revit por exemplo. Esta conversão deve ser feita com cuidado, analisando a plataforma de conversão antes de decidir qual a melhor opção. Algumas fontes referem que dificilmente a conversão de dados, do formato Revit para outro formato qualquer, é conseguida de forma satisfatória pelo que são desaconselhadas múltiplas conversões deste tipo de formato seja na conversão para outros formatos ou na ação contrária.

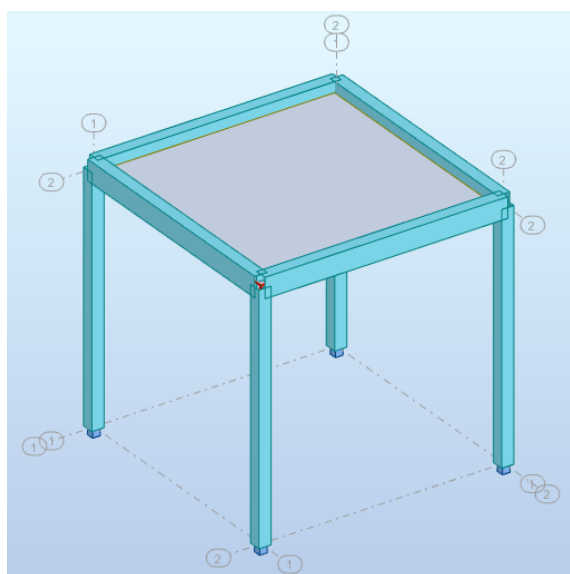
3 APLICAÇÃO DE SOFTWARE

3.1 CASOS DE ESTUDO

Antes de iniciar a apresentação das aplicações estudadas ao longo do desenvolvimento do estágio é necessário fornecer uma breve introdução aos principais casos de estudo abordados.

Os principais casos são três, mas existem mais alguns casos que são usados para exemplificar uma ou outra situação que não é possível demonstrar com os três primeiros casos. É possível categorizá-los em diferentes níveis de complexidade e tratamento de informação. O primeiro caso é o mais simples de todos e tem o propósito de demonstrar as principais funcionalidades de dimensionamento e modelação de estruturas em betão armado. Esta estrutura não foi alvo de qualquer pré-dimensionamento, sendo utilizadas secções *standard* do programa, foi pensada para ser o mais simples possível em termos de apresentação para facilitar o entendimento das funcionalidades do programa.

A estrutura deste caso é composta por pilares e vigas com 6 metros de comprimento e secções de 30 por 30 centímetros nos pilares e de 30 por 50 nas vigas. A laje é maciça e tem uma espessura uniforme de 25 centímetros. A classe de betão é C20/25 e o aço é A500.



a) Modelo Robot



b) Modelo Revit

Figura 3.1 – Caso de estudo 1

As cargas aplicadas, além do peso próprio, na estrutura são:

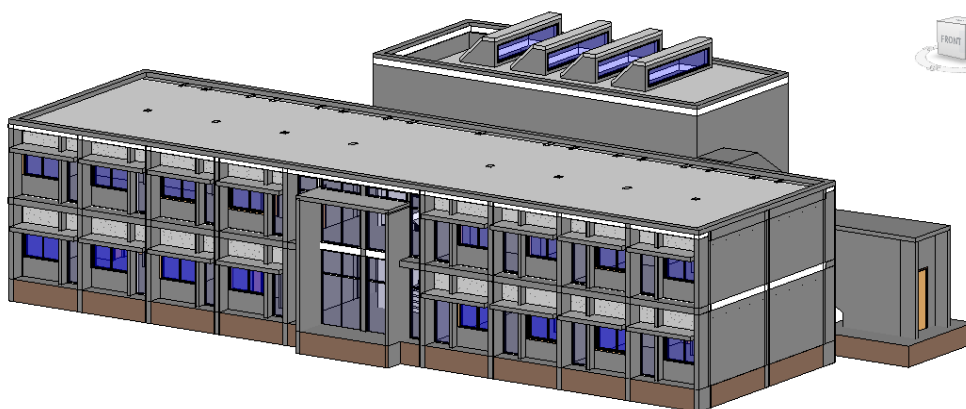
- Restantes cargas permanentes – 4 kN/m^2 ;
- Sobrecarga – 2 kN/m^2 .

Não são consideradas ações do vento, sísmicas ou acidentais neste primeiro caso.

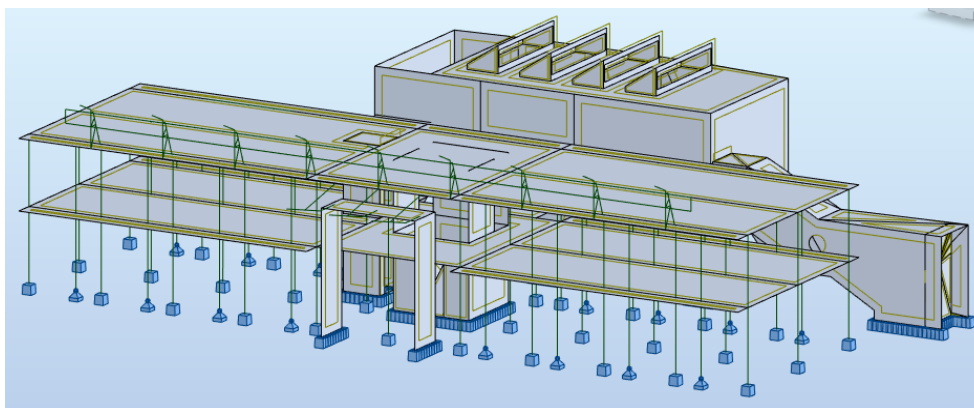
No segundo caso, a estrutura em estudo é um edifício projetado pela Newton: A construção do edifício não foi realizada em solo europeu, sendo assim, o seguimento exato dos Eurocódigos não é obrigatório e por isso algumas das soluções aplicadas podem não ir de encontro ao que é estipulado pelo documento normativo.

O objetivo deste caso foi o de permitir obter uma comparação entre os resultados dos programas e o que foi aplicado na construção, de modo a explorar em pleno as capacidades de dimensionamento dos programas em função da informação mais rigorosa e de um modelo estrutural mais completo.

Para o desenvolvimento dos modelos estruturais e de arquitetura da estrutura foram fornecidos os documentos CAD com as plantas de arquitetura/estruturas e pormenores técnicos.



a) Modelo Revit



b) Modelo Robot

Figura 3.2 – Caso de Estudo 2

É possível perceber pela figura 3.2 que não se trata de uma estrutura isolada. Esta é composta por um edifício principal composto por gabinetes e salas de reunião e um auditório anexo à estrutura principal. Ambos interligados por uma passagem no 1º piso.

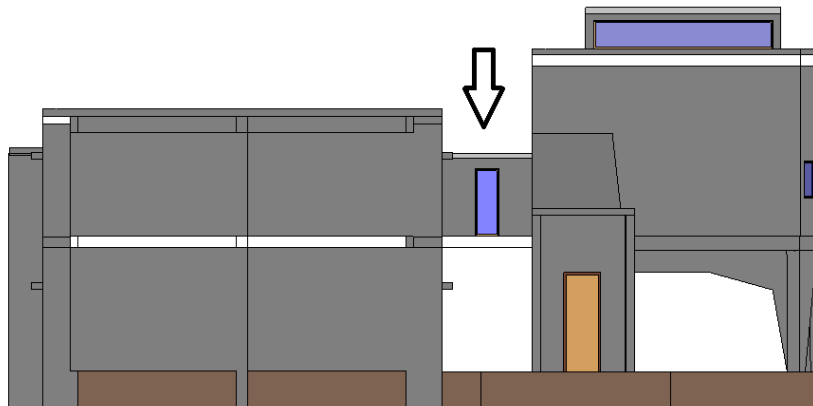
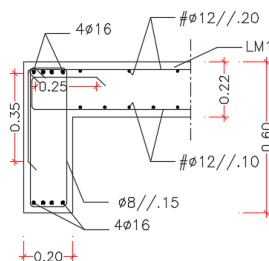


Figura 3.3 – Vista em Alçado da ligação entre as duas estruturas

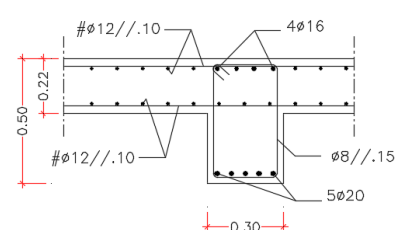
A composição estrutural deste caso é mais variada e tem como principais constituintes os seguintes elementos:

Viga V1



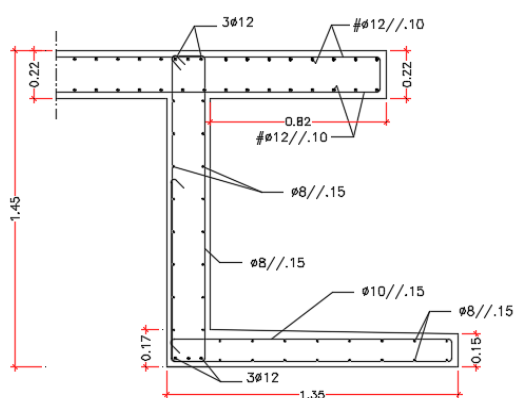
Viga 1 – 20 x 60 cm

Viga V2



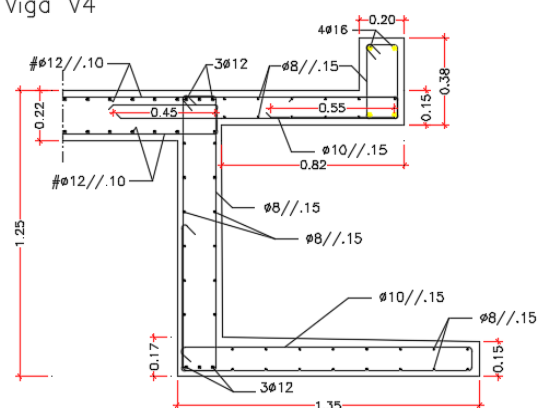
Viga 2 – 30 x 50 cm

Viga V3



Viga 3 – 20 x 145 cm

Viga V4



Viga 4 – 20 x 125 cm

Figura 3.4 – Vigas do caso de estudo 2

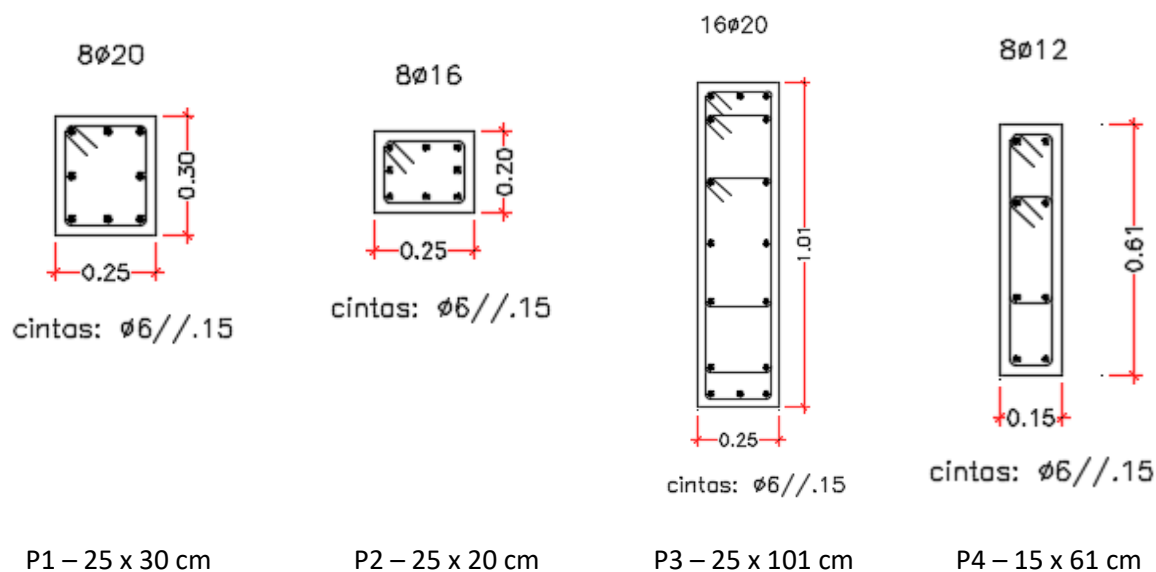


Figura 3.5 – Pilares do caso de estudo 2

Existem oito tipos de lajes maciças discriminadas em projeto:

- LM1 com 22 cm de espessura;
- LM2 com 25 cm;
- LM3 e LM5 com 15 cm;
- LM4 com 30 cm;
- LM6 com 18,5 cm;
- LM7 com 12 cm;
- LM8 com 20 cm.

Para paredes existem três tipos aplicados com 20, 15 e 33 centímetros de espessura.

Relativamente às ações, são consideradas ações do peso próprio, ações de revestimentos e paredes divisórias avaliadas segundo os materiais descritos no projeto de arquitetura, sobrecargas regulamentares e a ação do vento. As ações sísmicas não são estudadas por falta de informação relativa à zona de implantação.

Os materiais presentes são betão NP-EN 206-1 C25/30 e aço A400NR SD. A classe de exposição é XC2(P) e uma classe de utilização S3.

Em anexo é feita uma exploração mais rigorosa dos dados da estrutura.

O terceiro caso diz respeito a um modelo académico de um edifício residencial constituído por rés-do-chão e quatro andares elevados, localizado no concelho de Castelo Branco. Este caso foi pré-dimensionado pelo autor no âmbito do estudo da análise sísmica de uma estrutura, trabalho prático desenvolvido para a unidade curricular de Dinâmica de Estruturas no primeiro semestre do ano letivo de 2015/2016 [50].

Este modelo é, apesar de se suportar no modelo original do trabalho prático, uma adaptação do original visto que o mesmo era inicialmente constituído por lajes do tipo aligeirado. Para ter uma correspondência com o tema desenvolvido, as lajes foram alteradas para maciças duplamente armadas.

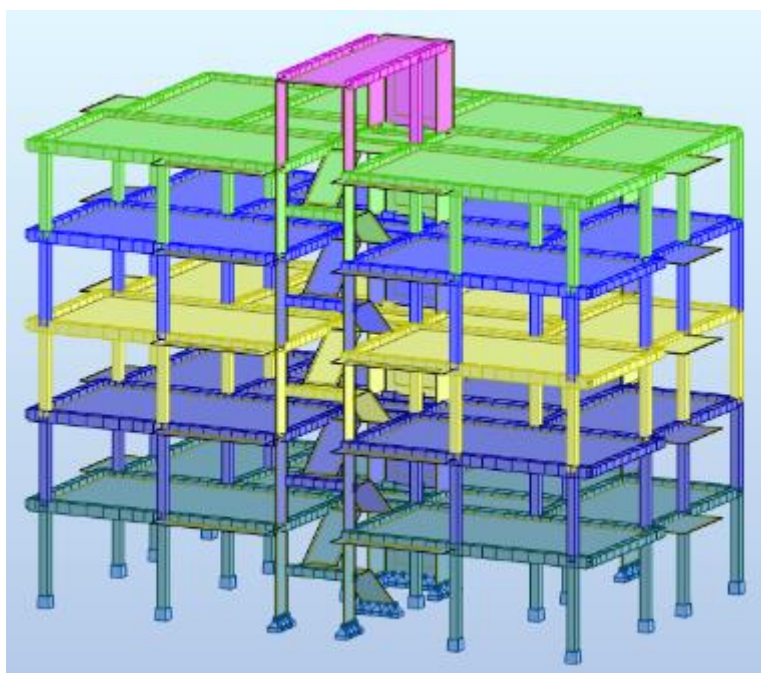


Figura 3.6 – Caso de estudo 3

Apesar de este caso ser mais simples que o segundo caso, é mais completo em termos de cargas e análise e é mais apropriado aos objetivos propostos para a última fase do estágio.

Esta estrutura apresenta na sua constituição quatro tipos de laje maciça, seis tipos de vigas, sendo três dessas secções são do tipo embebido, e cinco tipos de pilares, paredes incluídas. O betão é um C20/25 e o aço é um A400. Tal como no caso anterior, os restantes dados são apresentados em anexo dada a extensa quantidade de informação.

3.2 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

Neste ponto são analisados os módulos de análise e dimensionamento do Robot Structural Analysis 2017 e do PAC Pórticos.

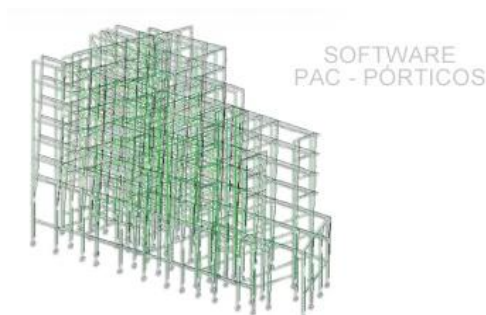
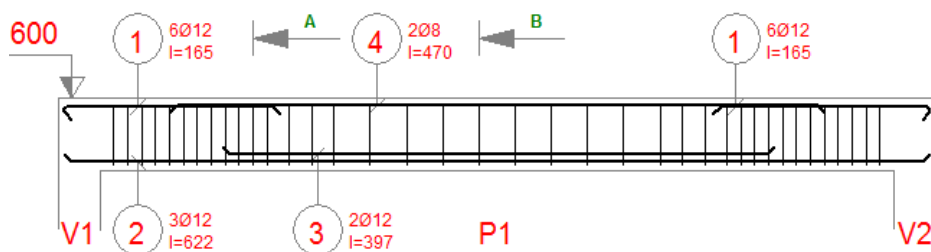
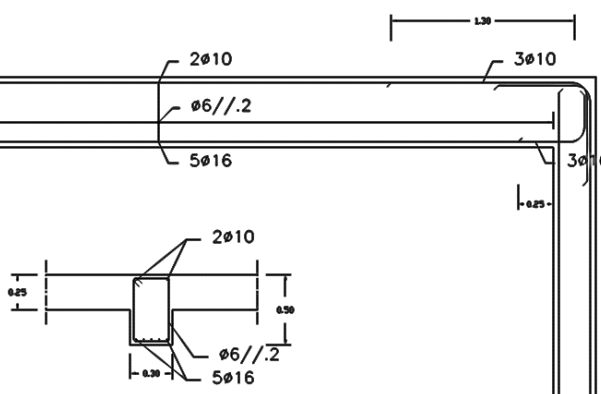


Figura 3.7 – Imagens de apresentação dos respectivos programas

Ambos os programas têm capacidades de análise e dimensionamento de elementos em betão armado com apresentação de peças desenhadas. A comparação é feita para demonstrar o potencial dos programas mais recentes face ao que é apresentado por programas com metodologias de análise e dimensionamento diferentes, mas semelhantes. Estes também apresentam diferenças nos formatos para apresentação dos modelos/desenhos de armaduras e no tratamento dos dados de análise, cálculo/dimensionamento. Com esta comparação será possível perceber se a evolução dos programas é significativa ou se existe alguma estagnação dos processos de modelação.



a) Robot Structural Analysis



b) PAC-Pórticos

Figura 3.8 – Exemplo de desenho de pormenor de armaduras

3.2.1 ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 2017

Em primeira análise ao *software*, começa-se pela fase de modelação. É nesta fase que é mais comum ocorrência de erros, na sua grande maioria devido ao utilizador. Caso se trate de uma primeira utilização é conveniente começar por definir os parâmetros básicos, de materiais, *databases* de códigos de dimensionamento, unidades de cálculo/análise estrutural, para situações não-lineares, sísmicas, modais e da malha de elementos finitos. Ainda não havia sido referido, o programa em estudo tem a capacidade de efetuar uma análise estrutural por elementos finitos. As alterações podem ser efetuadas acedendo às *Job Preferences* no menu *Tools*.

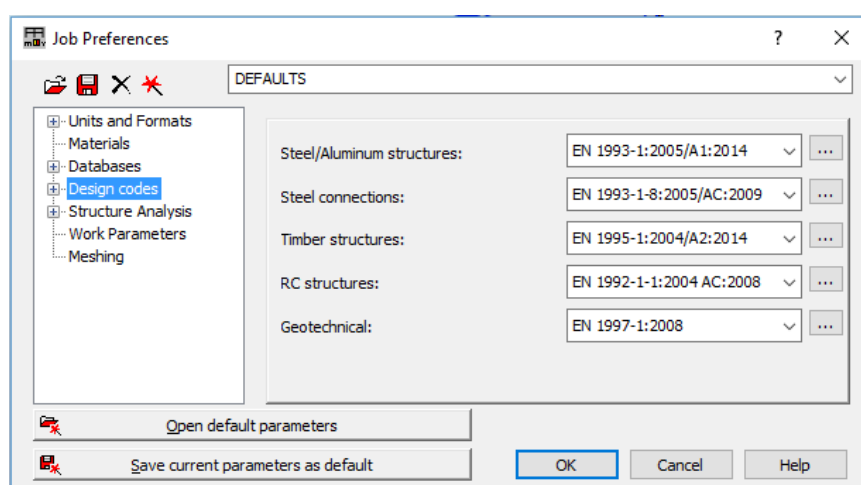


Figura 3.9 – Menu para definição das preferências de trabalho

O próximo passo é a definição do perfil de dimensionamento dos elementos. Neste caso só serão referidos os procedimentos para dimensionamento de betão armado, mas o *software* tem opções para dimensionamento de elementos metálicos e de madeira.

Acedendo ao menu *Design* é possível definir esses parâmetros de cálculo para elementos do tipo viga ou pilar e ainda para lajes e paredes. Estes parâmetros são intitulados de *Required Reinforcement of [Beams/Columns ou Slabs/Walls] – Options*. Este título “*Required*” existe porque estas regras são definidas para determinar os requisitos mínimos de armadura num dado elemento; só quando o elemento for encaminhado para a opção *Provided Reinforcement of RC Elements* é que são gerados modelos de armadura e notas de cálculo mais rigorosas. A vantagem de utilizar o módulo de cálculo dos requisitos mínimos é que este é muito mais rápido e não obriga a alterar definições de cálculo/modelação elemento a elemento, algo que é praticamente obrigatório no módulo de cálculo para fornecimento de modelos de armadura.

Ainda no módulo de definição de requisitos mínimos, para o caso das vigas e pilares é necessário definir os parâmetros relativos ao cálculo, relativos à geometria da peça e aos esforços considerados.

The figure shows two side-by-side windows titled 'Member Type Definition - EN 1992-1-1:2004 AC:2008'.
 Window (a) is for an 'RC Beam'. It has tabs for 'Beam' and 'Column'. The 'Member' dropdown is set to 'RC Beam'. Under 'Span length', 'at support faces' is selected with values 0,40 m at the beginning and end. 'Support width' is also set to 0,40 m. There are options for 'Admissible deflection' (Relative or Absolute) and 'T-beam (slab considered)' with maximum slab widths b1 and b2. A diagram of a T-beam cross-section is shown. Under 'Calculations for forces', checkboxes for Fx, My/Fz, Mz/Fy, and Mx are present, with 'M N' and 'V Mx' indicated. Buttons for 'Note', 'Save', 'Close', and 'Help' are at the bottom.
 Window (b) is for an 'RC Column'. The 'Member' dropdown is set to 'RC Column'. It has sections for 'Buckling with respect to Y axis' and 'Buckling with respect to Z axis', each with options for 'Member length ly/lz' (at support faces or in axes) and 'Buckling length coefficient' (Ky, Kz). The 'Maximum node displacement' section has input fields for uy and uz. A red 'X' is marked over the 'Additional parameters' button. Buttons for 'Note', 'Save', 'Close', and 'Help' are at the bottom.

a) Vigas

b) Pilares

Figura 3.10 – Parâmetros padrão para definição de esforços e características geométricas adicionais

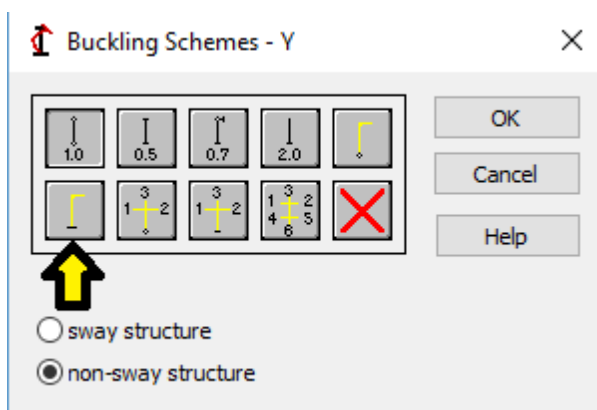
Em vigas de betão armado, o tipo padrão define o comprimento de vão como a distância entre as faces internas dos pilares/apoios do pórtico definido na estrutura, e assume ainda uma largura de suporte com 40 cm de desenvolvimento em qualquer direção. Tem em consideração os esforços de corte e flexão atuantes em apenas uma das direções principais, assim como os esforços de compressão e torção ao longo da peça. Por opção do programa, o tipo padrão não avalia o valor da flecha já que para isso é necessário estabelecer um valor limite de deformação. Ao possibilitarmos o cálculo da deformação fica igualmente disponível um parâmetro adicional onde é definido o valor de rigidez de cálculo do elemento. Podemos optar por utilizar o valor de rigidez mínimo ou um valor médio.

Existe ainda a opção de considerar a viga como sendo do tipo T, definindo a largura de banzo efetivo através de uma largura definida pelo utilizador ou em função da espessura das lajes adjacentes para cálculo das armaduras mínimas.

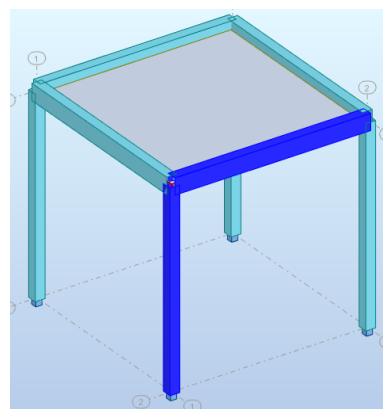
Como se pode ver pela figura 3.10, todos estes parâmetros são editáveis e cabe ao utilizador definir o que se adequa ao projeto. Podem-se criar diversos perfis e aplicá-los em função das peças presentes e dos esforços atuantes.

Com os pilares é seguido o mesmo princípio, existindo um perfil de cálculo padrão onde é definido o comprimento do pilar e os coeficientes de encurvadura. Por defeito só é considerado o efeito de encurvadura para um único sentido e o coeficiente base considerado é o unitário. Mais uma vez, cabe ao utilizador definir o coeficiente desejado. O programa tem a capacidade de calcular o coeficiente em

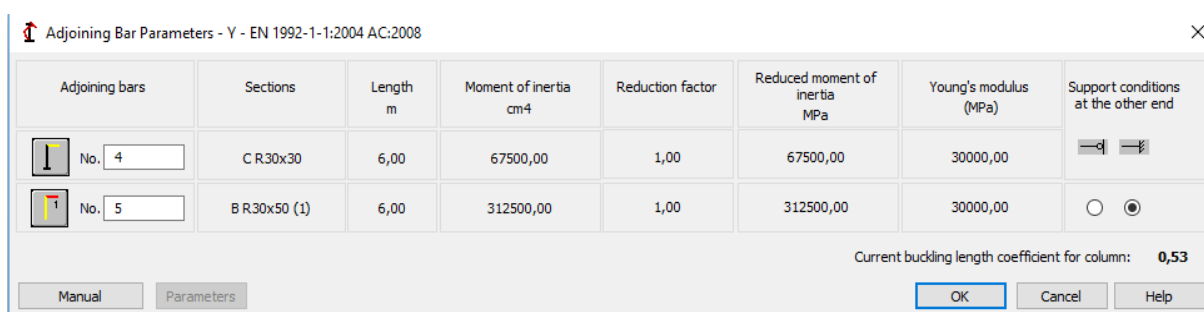
função dos elementos associados aos nós do pilar ou apenas atribuir um coeficiente global que garanta a segurança da estrutura e um dimensionamento conservativo dos elementos de betão armado. A segunda opção pode ser vantajosa em casos onde não se justifica a criação de diversos perfis de dimensionamento. A primeira obriga a escolher um pilar e a definir os elementos diretamente conectados, mas a tipologia de cálculo pode ser atribuída a qualquer elemento da estrutura. Por exemplo, num piso onde todos os pilares de canto partilhem ligações idênticas, basta criar um perfil em função de um desses pilares e de seguida aplicar esse mesmo perfil aos restantes.



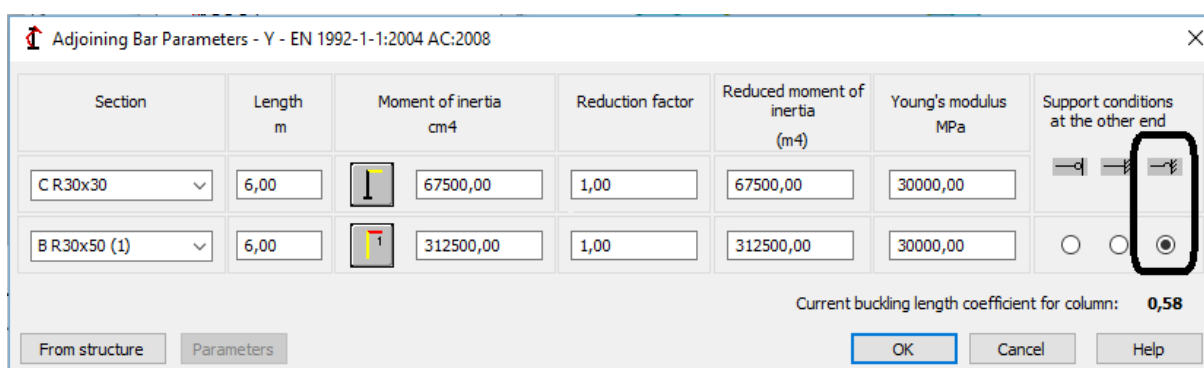
a) Janela para definição do tipo de ligação



b) Viga e Pilar selecionados



c) Janela para definição dos elementos de ligação a partir da estrutura



d) Janela para definição manual dos elementos de ligação

Figura 3.11 – Menu para definição do coeficiente de encurvadura

A diferença entre o *input* manual e o *input* direto da estrutura encontra-se na possibilidade de definir a ligação dos nós como parcialmente encastrada, é possível verificar a diferença comparando a figura 3.11 c) e d). Em pilares existem ainda parâmetros adicionais que permitem definir qual a abordagem de cálculo para a flexão desviada, sempre em função do que se encontra disposto no regulamento.

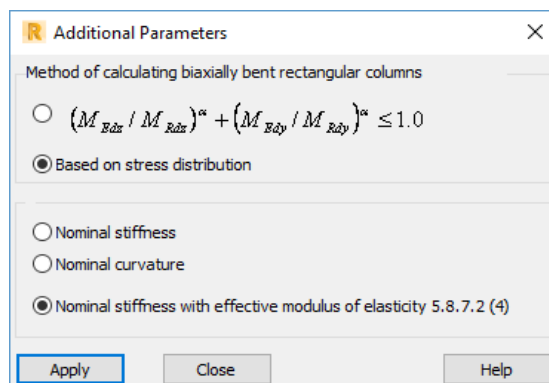
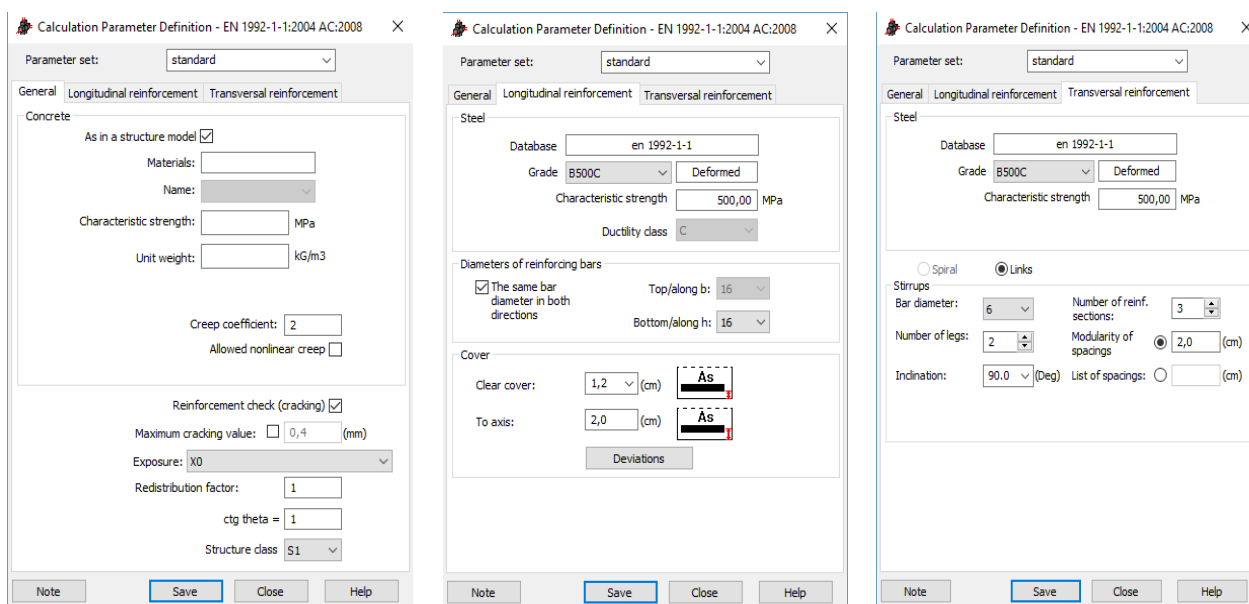


Figura 3.12 – Parâmetros adicionais em pilares

Além destes, ainda existem os parâmetros de cálculo de armadura. Novamente, o programa possui um perfil *standard*, mas permite a definição de novos perfis de cálculo.



a) Generalidades

b) Armadura longitudinal

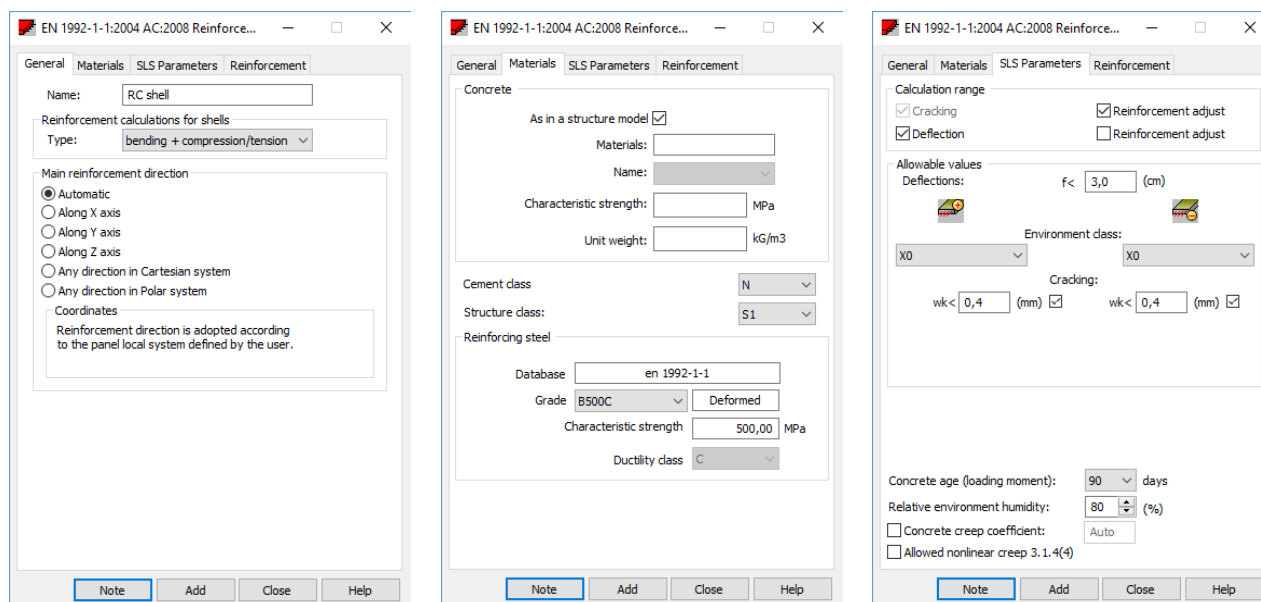
c) Armadura transversal

Figura 3.13 – Menu de definição dos parâmetros de cálculo para vigas e pilares

Descrevendo a figura 3.13, da imagem a) à imagem c). Na primeira imagem são definidos os parâmetros materiais do betão, que podem ser definidos manualmente ou em função dos materiais atribuídos às secções existentes no modelo, as condições de exposição, a categoria de utilização da estrutura, parâmetros relacionados com valores limite ou constantes para o dimensionamento estrutural, como o coeficiente de fluência, ou o limite de largura de fenda. Na imagem b) e c) são estabelecidas as armaduras

longitudinais e transversais, desde o tipo de aço dos varões, diâmetro e até o valor de recobrimento nominal e efetivo. Na armadura transversal é ainda possível definir o número de ramos e o número de zonas de distribuição a instalar.

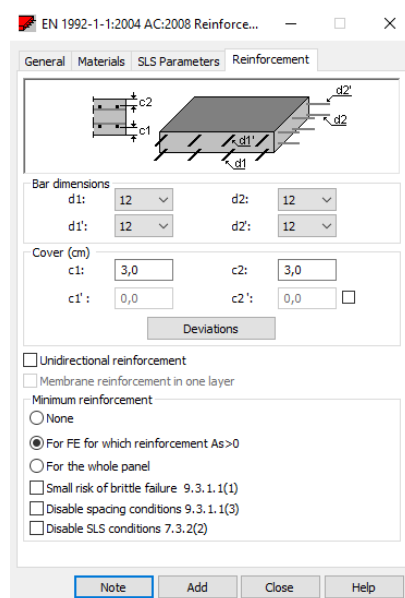
Em lajes as regras encontram-se resumidas a um único menu para definição de parâmetros de cálculo. Deixa de existir a necessidade de definir parâmetros geométricos.



a) Generalidades

b) Materiais

c) Parâmetros ELS



d) Armadura longitudinal

Figura 3.14 - Menu de definição dos parâmetros de cálculo para lajes/paredes

A base de cálculo, como é possível perceber pela figura 3.14, é um perfil geral, já que faz a verificação a qualquer esforço atuante, e como o nome do perfil indica (RC Shell) este é aplicável a qualquer tipo de

painel, desde que este seja um elemento casca com malha de elementos finitos definida. Os pontos que podem ser alterados para uma correspondência às exigências do utilizador são relativos à direção da armadura e ao tipo de esforços a considerar no painel. Os parâmetros materiais permitem definir a classe de betão e o tipo de aço. Nos parâmetros ELS (Estados Limite de Serviço) são definidos os limites de deformação e largura de fendas admissíveis assim como a possibilidade de ajuste da armadura na laje para que esta seja capaz de cumprir os limites aplicáveis sem necessidade de alterar a espessura do painel; o programa também tem capacidade para calcular o coeficiente de fluência exato através dos *inputs* definidos tanto no menu b) como no menu c) da figura 3.14. O menu de definição de armaduras, tal como acontece para os menus de vigas e pilares, permite introduzir valores de recobrimento nominal, diâmetro dos varões e, mais interessante, a possibilidade de definir se pretendemos que a laje seja armada unidireccionalmente. Existe também a possibilidade de definir se o valor de armadura mínima é aplicado ao longo de todo o painel, se preferimos que este seja disposto segundo as exigências normativas para rotura frágil ou seguindo o princípio de cálculo mais rigoroso presente no ponto 7.3.2(2) do EC2.

Estes parâmetros são bastante mais simples de definir/aplicar e permitem um estudo mais rápido da estrutura assim como uma primeira ideia do que poderá ser a solução final de armadura.

Apesar de todas as vantagens, este módulo de cálculo tem algumas desvantagens. Antes de serem referidas quais, é necessário falar um pouco do método de modelação do programa e das suas capacidades de análise mais básicas. Serão observações breves uma vez que só interessa abordar o porquê de a modelação por vezes não ser tão simples quanto se desejaria.

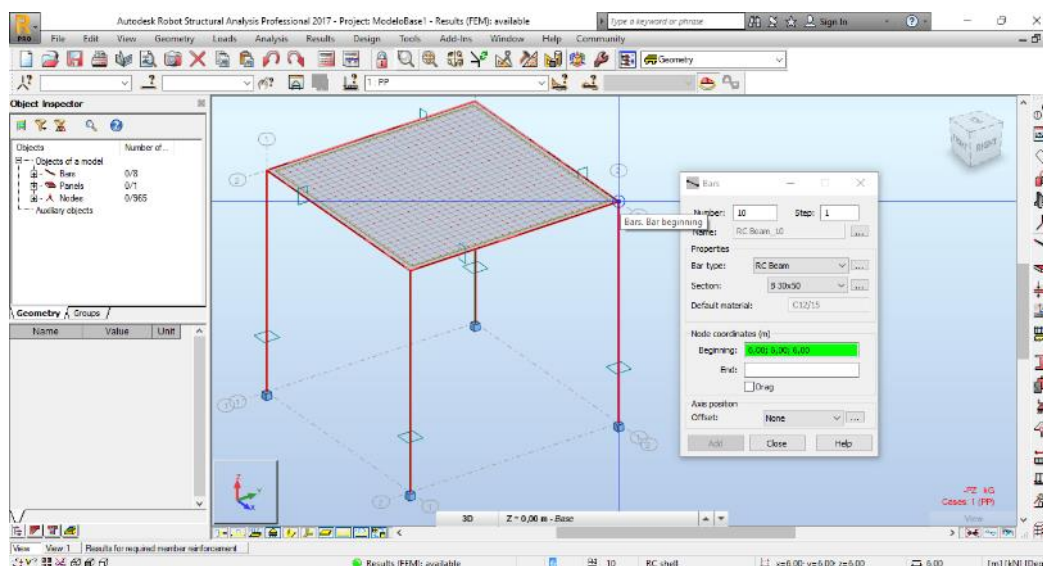


Figura 3.15 – Exemplo da interface em modo de criação de barras

Deixando de parte a criação de secções paramétricas, o *software* permite a criação de diversos tipos de secção de maneira a que seja possível definir a geometria de secção pretendida, assim como o tipo de betão que a compõe. A criação de elementos de barra em Robot é simples de executar, bastando definir

as coordenadas de início e fim das barras segundo os eixos globais da estrutura, ou se existirem pontos de referência, clicar nos mesmos para definir a posição dos elementos no modelo. Os pontos de referência podem ser definidos através da criação de grelhas auxiliares.

Para a criação de painéis e aberturas o princípio de modelação é semelhante, mas o processo de edição pode passar por definir um contorno do painel, onde se define se é retangular, com arcos, circular, etc, ou até definir os limites do painel através de elementos que façam um contorno físico do mesmo (por exemplo, as vigas de suporte em cada extremo de uma laje)

Em vigas e pilares este método de criação escapa praticamente ileso à possibilidade de erros na junção de diversos elementos, apesar de existir a hipótese de desencontro de algumas barras num dado nó. Em lajes isso já não acontece com tanta frequência, muitas das vezes por incompatibilidade entre as malhas de elementos finitos de painéis adjacentes. O que acontece é que o programa apesar de possuir, durante a sua utilização, indicadores de *snap*, símbolo que surge quando o cursor do rato se fixa num dado nó ou ponto de referência da estrutura, estes por vezes induzem em erro e criam um ponto que supostamente estaria na mesma posição que a referência em causa, mas por algum motivo o programa resolve criá-lo uns milímetros ao lado do esperado. Em barras, o que o programa acaba por indicar é a existência de pontos duplicados, habitualmente é possível eliminar rapidamente estes pontos, apesar de que, por vezes o programa obriga a recriar determinadas barras para conseguir compatibilizar os elementos da estrutura. Em lajes o problema acaba por ser mais grave. A desconexão entre os diversos painéis gera erros de inconsistência de resultados, e pode levar à impossibilidade da criação de negativos. Isto acontece porque uma ligeira distorção do painel faz com que este deixe de ser um elemento planar e o programa não consegue conciliar a geometria da abertura com a do painel. A solução neste tipo de casos passa por recriar novamente o painel de forma mais precisa, ou criar diversos painéis que sejam capazes de garantir uma ligação funcional entre si. Se o problema estiver só na malha, este pode ser resolvido fazendo um refinamento da mesma ou suavizando-a. O programa tem opções para criação automática de malhas capazes de contrariar alguns problemas que possam surgir, podendo ser no entanto necessário fazer mais do que uma tentativa até se obter uma solução estável. É por isso recomendado verificar se a estrutura se encontra isenta de erros de modelação/compatibilidade entre elementos/malhas antes de seguir para a fase de aplicação de cargas.

A aplicação de cargas e a criação de casos de combinação de cargas são simples de aplicar e o programa tem a opção de criar os casos de combinação em função da NP EN 1990:2009 (EC0). O problema que pode ocorrer nesta fase é a criação de cargas em duplicado, ou falha na aplicação das mesmas num dado elemento, problema que pode ser grave, mas que, em função da complexidade da estrutura, pode ser fácil de identificar e corrigir.

Em termos de esforços e de análise estática, o programa tem duas formas distintas de analisar a estrutura, através de malhas de elementos finitos (MEF) ou elementos finitos de barra (EFB), caso as lajes sejam consideradas como diafragmas rígidos ou caso seja simplesmente aplicado um painel do tipo *cladding*.

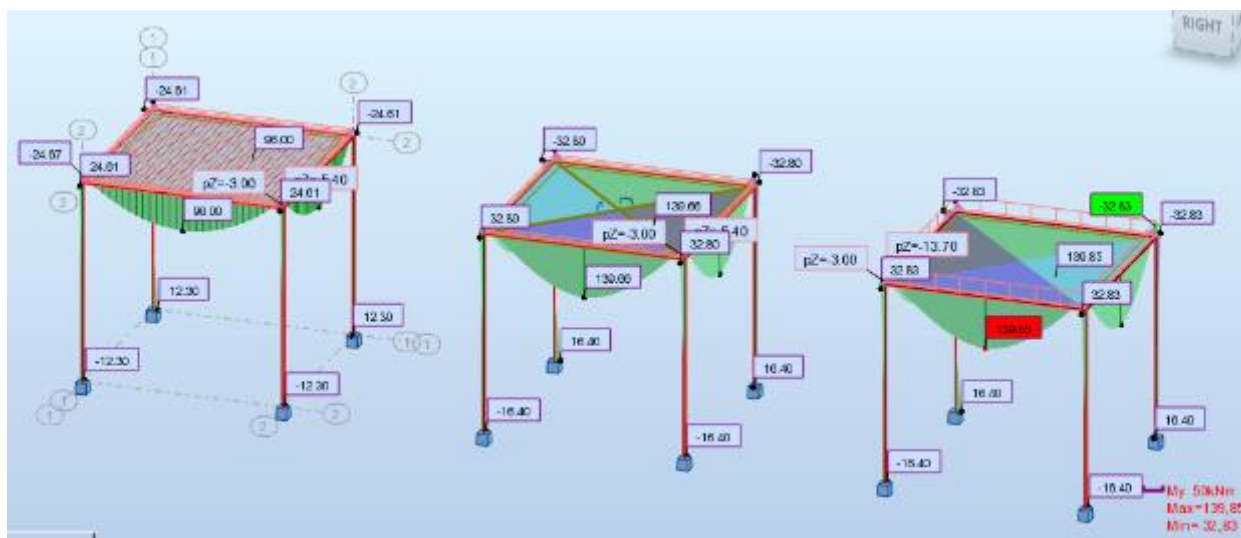


Figura 3.16 – Comparação entre métodos de análise I – Esforços de flexão

Na figura 3.16 apresentam-se, da esquerda para a direita, a laje com uma malha de elementos finitos, de seguida uma laje com diafragma rígido e por último um *cladding*. O uso de *cladding* obriga a considerar o peso próprio da laje como uma carga adicional, nos restantes casos este é automaticamente considerado pelo programa.

Na figura estão visíveis os valores de flexão segundo os eixos locais Y. Os eixos locais e o global são outros parâmetros igualmente importantes para a fase de análise de uma estrutura e convém ter a certeza que estes estão dispostos de maneira correta caso contrário pode-se incorrer em erros de análise graves.

A diferença entre os resultados máximos presentes na figura é acentuada, mas isto só acontece para os esforços de flexão. Nos esforços de corte (ver figura 3.17) essa diferença também existe, mas atinge um valor máximo de 2 kN de diferença. O problema para os esforços de corte está na distribuição dos esforços, a malha de elementos finitos tem uma diluição da carga muito mais acentuada ao longo da viga. Nos resultados de flexão esta discrepância deve-se ao método de análise em si, uma vez que o método de análise por EF está associado à obtenção de soluções aproximadas, sem verificar as condições de equilíbrio locais. Diz Luís Castro, na sua publicação “*Método dos elementos finitos: Análise de pórticos planos*” [51], que “... o MEF conduz a soluções que estão contra a segurança. ..., esta ferramenta deve ser utilizada sempre com bastante cuidado e deve ser sempre efetuada uma análise crítica cuidada dos resultados obtidos.”. Ou seja, este é um método versátil e fácil de adaptar, mas nem sempre é a melhor abordagem para determinados casos. A principal vantagem deste método neste *software* resulta da possibilidade de realizar uma análise e um dimensionamento de lajes/paredes, coisa que não é possível se considerarmos os elementos de casca como elementos rígidos.

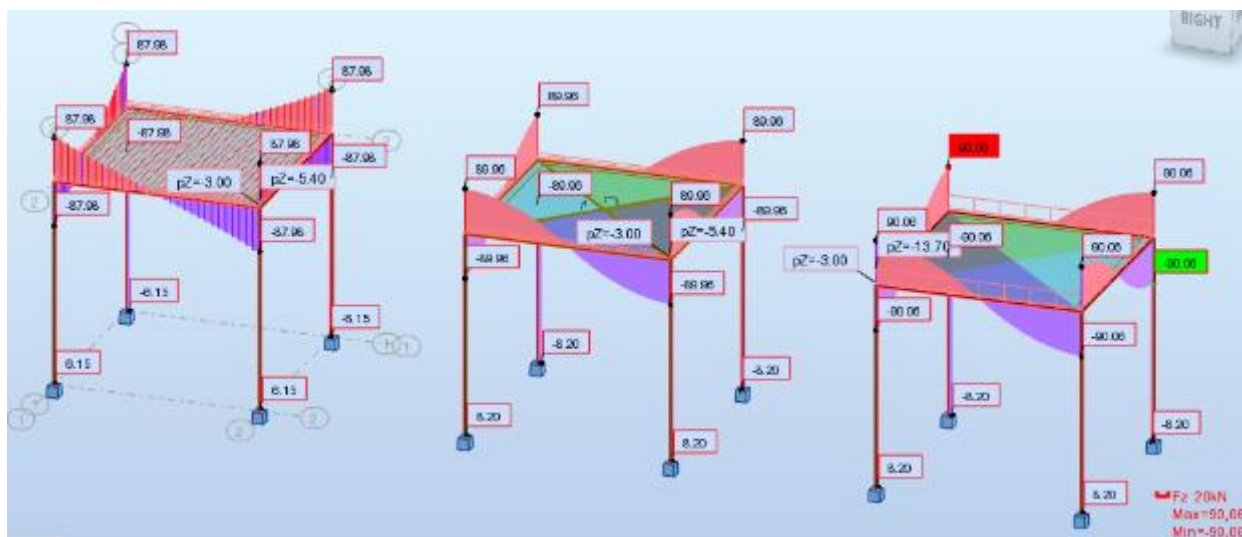


Figura 3.17 – Comparação entre métodos de análise II – Esforços Transversos

Outro pormenor de modelação que é igualmente importante, é a ligação entre vigas e paredes. Se estes dois tipos de elemento tiverem uma ligação perfeitamente ortogonal não é verificado nenhum problema em relação aos resultados obtidos, mas à medida que se vai perdendo essa ortogonalidade a ligação entre as vigas e as paredes vai-se degradando até atingir um ponto em que a ligação é considerada como um apoio simples. Para minimizar esse efeito é necessário criar uma extensão da viga para o interior da parede de forma a obter o que se pode considerar como um encastramento parcial.

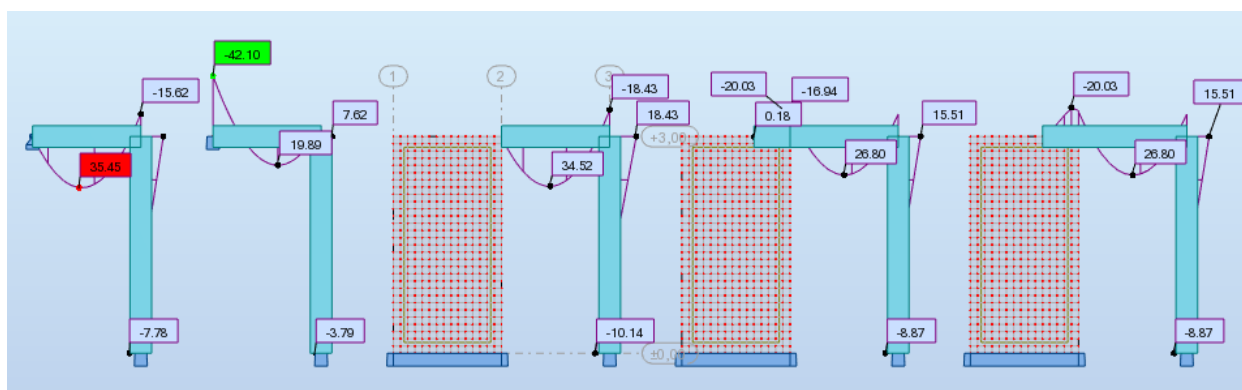


Figura 3.18 – Exemplos de ligação entre uma viga e uma parede

Como se pode observar na figura 3.18, os dois primeiros exemplos à esquerda, representam um pilar encastrado na base e uma viga onde o apoio mais à esquerda é duplo, primeiro exemplo, e no seguinte o apoio à esquerda da viga é do tipo encastrado. Comparando os três exemplos de ligação a uma parede com os dois primeiros podemos perceber que o erro referido no parágrafo anterior ocorre. A ligação do primeiro exemplo comporta-se como uma rótula, sem transferência de momentos, e os exemplos seguintes, seja a extensão da viga sobre a parede uma secção nova ou não, apresentam resultados com cerca de metade do valor de um encastramento perfeito. Apesar de o valor continuar a estar do lado da insegurança este encastramento parcial já é mais próximo do expectável numa situação real.

Em suma, este é um *software* com enorme potencial de cálculo, mas não deverá ser usado sem ter em mente as particularidades que o acompanham. Um utilizador inexperiente facilmente se esquece de alterar um parâmetro de cálculo essencial ou modela de forma incorreta um dado elemento, pondo em causa toda a análise e dimensionamento de uma dada estrutura.

Para finalizar o tema da modelação fica um último conselho; para estruturas onde as lajes, por exemplo, sejam idealizadas com uma constituição por chapas metálicas, a melhor abordagem é conferir a essas chapas o atributo de diafragma rígido e realizar a verificação aos ELU e aos ELS das chapas separadamente. Este conselho é dado porque, em elementos de casca com espessuras inferiores às das dezenas de milímetros, o programa por vezes não consegue compatibilizar os esforços de todos os nós da malha e surgem instabilidades no decorrer dos cálculos. Muitas destas instabilidades acabam por nem ocorrer nos painéis que as originam, sendo praticamente impossível descobrir a origem do erro.

Passando novamente o foco do tema para o dimensionamento das áreas de armadura necessárias, após a definição dos perfis de cálculo e de toda a modelação associada é possível proceder ao cálculo das necessidades de armadura mínimas através do módulo *RC Members – required reinf.*.

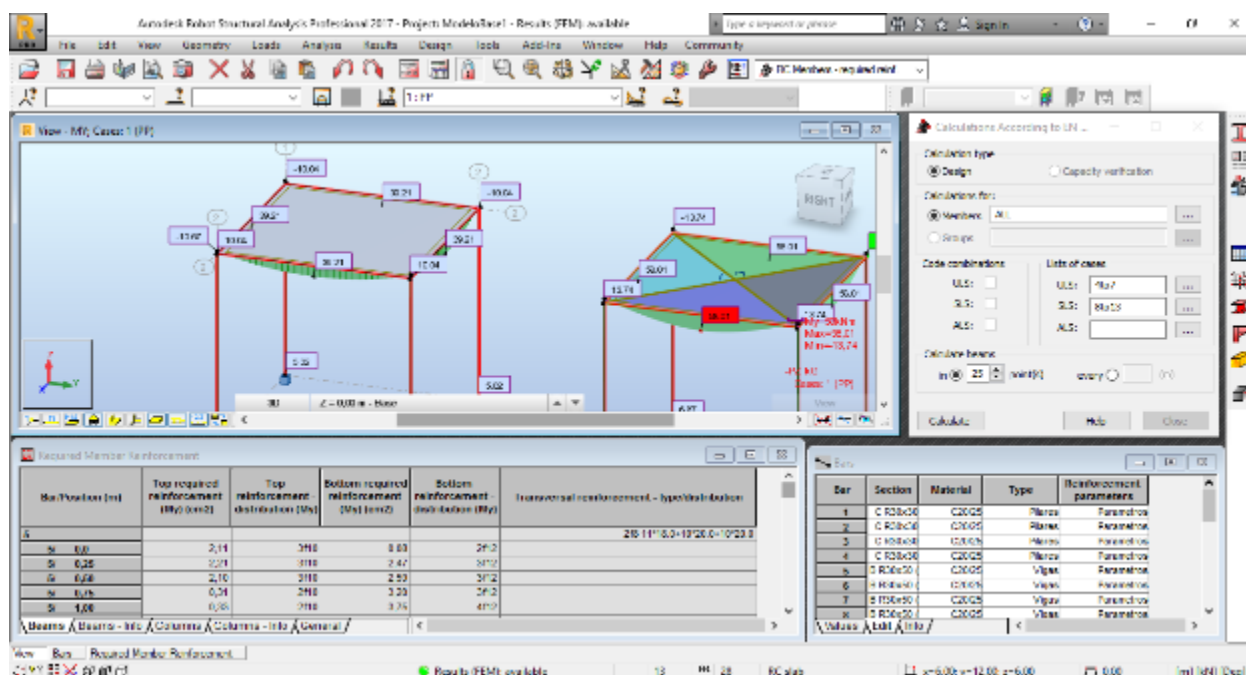


Figura 3.19 – *Layout* da interface para cálculo do *required reinforcement* para elementos barra em B.A.

Atendendo à figura 3.19, ao entrarmos no módulo acima mencionado é-nos apresentado um conjunto de janelas. São quatro janelas ao todo, uma que permite visualizar a estrutura, assim como interagir com o modelo e executar qualquer ferramenta do programa, como visualizar diagramas ou mapas de esforços por exemplo. A janela do topo à direita permite a seleção de barras, visualizar a lista de casos para dimensionamento ULS, SLS e ALS e ainda fazer a definição do número de pontos relevantes para análise ao longo da viga. É nesta janela que é feito o pedido de cálculo. As duas janelas inferiores são informativas.

A da esquerda, após o cálculo, apresenta os resultados relativos às áreas, assim como o número de varões a instalar na secção, entre outras informações relevantes, o momento de dimensionamento ou o caso de carga alusivo. A janela da direita apresenta as informações relativas às barras em análise; tipo de secção, material e parâmetros de dimensionamento.

Para ser mais fácil entender o tipo de resultados fornecidos são seguidamente apresentados os resultados relativos a duas vigas e a dois pilares, um elemento da estrutura com MEF e outro do modelo com diafragma rígido.

Tabela 3.1 – Resultados de armadura longitudinal necessária (viga MEF)

| Bar | Position (m) | Top required reinforcement (My) (cm2) | Top reinforcement - distribution (My) | Bottom required reinforcement (My) (cm2) | Bottom reinforcement - distribution (My) | Design moment My (kNm) |
|-----|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|
| 5 | 0 | 2,11 | 3f10 | 0,08 | 2f12 | -24,67 |
| 5 | 0,25 | 2,21 | 3f10 | 2,47 | 3f12 | -22,6 |
| 5 | 0,5 | 2,1 | 3f10 | 2,59 | 3f12 | 29,2 |
| 5 | 0,75 | 0,31 | 2f10 | 3,2 | 3f12 | 28,62 |
| 5 | 1 | 0,33 | 2f10 | 3,75 | 4f12 | 36,27 |
| 5 | 1,25 | 0,33 | 2f10 | 4,42 | 4f12 | 43,3 |
| 5 | 1,5 | 0 | - | 4,61 | 5f12 | 49,3 |
| 5 | 1,75 | 0 | - | 5,03 | 5f12 | 54,22 |
| 5 | 2 | 0 | - | 5,32 | 5f12 | 57,68 |
| 5 | 2,25 | 0 | - | 5,54 | 5f12 | 60,38 |
| 5 | 2,5 | 0 | - | 5,68 | 6f12 | 62,08 |
| 5 | 2,75 | 0 | - | 5,73 | 6f12 | 62,74 |
| 5 | 3 | 0 | - | 5,74 | 6f12 | 62,8 |
| 5 | 3,25 | 0 | - | 5,73 | 6f12 | 62,74 |
| 5 | 3,5 | 0 | - | 5,68 | 6f12 | 62,08 |
| 5 | 3,75 | 0 | - | 5,54 | 5f12 | 60,38 |
| 5 | 4 | 0 | - | 5,32 | 5f12 | 57,64 |
| 5 | 4,25 | 0 | - | 5 | 5f12 | 53,88 |
| 5 | 4,5 | 0 | - | 4,61 | 5f12 | 49,3 |
| 5 | 4,75 | 0,33 | 2f10 | 4,42 | 4f12 | 43,3 |
| 5 | 5 | 0,34 | 2f10 | 3,75 | 4f12 | 36,21 |
| 5 | 5,25 | 0,31 | 2f10 | 3,17 | 3f12 | 28,05 |
| 5 | 5,5 | 2,1 | 3f10 | 2,59 | 3f12 | 29,2 |
| 5 | 5,75 | 2,21 | 3f10 | 2,47 | 3f12 | -22,6 |
| 5 | 6 | 2,11 | 3f10 | 0,08 | 2f12 | -24,67 |

Tabela 3.2 – Resultados de armadura transversal necessária (viga MEF)

| Bar | Design force Qz (kN) Max/Min | Transversal reinforcement - type/distribution |
|-----|------------------------------|-----------------------------------------------|
| 5 | 87,98/-87,98 | 2f8 11*18.0+10*20.0+10*20.0 |

Tabela 3.3 – Resultados de armadura longitudinal necessária (viga EFB)

| Bar | Position (m) | Top required reinforcement (My) (cm2) | Top reinforcement - distribution (My) | Bottom required reinforcement (My) (cm2) | Bottom reinforcement - distribution (My) | Design moment My (kNm) | Design force Qz (kN) |
|-----|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|----------------------|
| 14 | 0 | 2,5 | 4f10 | 0 | - | -32,8 | 89,96 |
| 14 | 0,25 | 2,5 | 4f10 | 2,85 | 3f12 | -30,57 | 88,19 |
| 14 | 0,5 | 2,5 | 4f10 | 2,85 | 3f12 | 30,01 | 85,39 |
| 14 | 0,75 | 0 | - | 3,83 | 4f12 | 32,86 | 81,54 |
| 14 | 1 | 0 | - | 5,15 | 5f12 | 45,05 | 76,65 |
| 14 | 1,25 | 0 | - | 6,31 | 6f12 | 56,18 | 70,72 |
| 14 | 1,5 | 0 | - | 7,27 | 7f12 | 66,09 | 63,74 |
| 14 | 1,75 | 0 | - | 8,08 | 8f12 | 74,62 | 55,72 |
| 14 | 2 | 0,03 | 2f10 | 8,73 | 8f12 | 81,59 | 46,66 |
| 14 | 2,25 | 0,01 | 2f10 | 9,21 | 9f12 | 86,84 | 36,56 |
| 14 | 2,5 | 0,01 | 2f10 | 9,51 | 9f12 | 90,2 | 25,42 |
| 14 | 2,75 | 0,02 | 2f10 | 9,63 | 9f12 | 91,5 | 13,23 |
| 14 | 3 | 0,04 | 2f10 | 9,64 | 9f12 | 91,61 | 0 |
| 14 | 3,25 | 0,02 | 2f10 | 9,63 | 9f12 | 91,5 | -13,23 |
| 14 | 3,5 | 0,01 | 2f10 | 9,51 | 9f12 | 90,2 | -25,42 |
| 14 | 3,75 | 0,01 | 2f10 | 9,21 | 9f12 | 86,84 | -36,56 |
| 14 | 4 | 0,03 | 2f10 | 8,73 | 8f12 | 81,59 | -46,66 |
| 14 | 4,25 | 0 | - | 8,08 | 8f12 | 74,62 | -55,72 |
| 14 | 4,5 | 0 | - | 7,27 | 7f12 | 66,09 | -63,74 |
| 14 | 4,75 | 0 | - | 6,31 | 6f12 | 56,18 | -70,72 |
| 14 | 5 | 0 | - | 5,15 | 5f12 | 45,05 | -76,65 |
| 14 | 5,25 | 0 | - | 3,83 | 4f12 | 32,86 | -81,54 |
| 14 | 5,5 | 2,5 | 4f10 | 2,85 | 3f12 | 30,01 | -85,39 |
| 14 | 5,75 | 2,5 | 4f10 | 2,85 | 3f12 | -30,57 | -88,19 |
| 14 | 6 | 2,5 | 4f10 | 0 | - | -32,8 | -89,96 |

Tabela 3.4 – Resultados de armadura transversal necessária (viga EFB)

| Bar | Design force Qz (kN) Max/Min | Transversal reinforcement - type/distribution |
|-----|------------------------------|-----------------------------------------------|
| 14 | 89,96/-89,96 | 2f8 11*18.0+6*32.0+10*20.0 |

Uma vez que ambas as estruturas têm uma secção retangular/quadrada simples com vãos de seis metros para todas as vigas e pilares, justifica-se a apresentação de resultados para um único elemento de cada tipo dada a igualdade de resultados entre elementos de cada estrutura.

A primeira observação que se pode fazer aos resultados deste módulo respeita aos diâmetros dos varões: este módulo não faz a verificação ao espaçamento livre entre varões longitudinais e coloca um n número de varões tendo em conta a área mínima para cumprir os mínimos necessários dos valores de segurança. Dando como exemplo a armadura máxima longitudinal que o programa recomenda para a viga EFB:

$$d_{\text{livre}} = \frac{300 - 2 * 30 - 2 * 8 - 9 * 12}{8} = 14,5 \text{ mm} \geq \text{máx}(12; 15 + 5; 20) = 20 \text{ mm} \rightarrow \textbf{KO!}$$

Esta verificação não acontece porque o módulo simplifica o cálculo e assume como única hipótese de diâmetro o que foi previamente estabelecido nos parâmetros, ver figura 3.13 b). Além do número de varões, outra opção que afeta os resultados é o recobrimento definido nos parâmetros, uma vez que este

não se adapta à solução de armadura transversal e os cálculos podem acabar por se desviar ligeiramente do valor real de capacidade resistente.

Uma boa funcionalidade que o módulo tem é o de decidir a armadura em função do caso mais condicionante. Pretende-se com isto dizer que o programa é capaz de reconhecer os limites para os SLS e adaptar a solução em função dessas limitações. Caso a solução inicial, capaz de responder às necessidades dos casos ULS, não seja capaz de garantir as condições de serviço, surge uma janela auxiliar que permite, em função de um “jogo” com percentagens adicionais de armadura, chegar a uma solução “final” adequada às condições de deformação/fendilhação.

Novamente fica o aviso sobre os esforços obtidos por MEF em comparação direta com o segundo método de quantificação de esforços, a diferença entre as áreas de armadura é próxima do dobro, algo bastante significativo em termos de quantificação de material e de garantia de segurança estrutural. Uma opção que se pode mitigar com um refinamento da malha, algo que apesar de ser uma solução viável pode ser pouco vantajoso para o modelo porque quantos mais pontos de análise, mais complexo o modelo se torna e mais difícil a possibilidade de realizar uma análise rápida da estrutura.

Para a armadura transversal o módulo funciona da mesma maneira, com o diâmetro da armadura, o número de secções de armadura, entre outros parâmetros, a serem definidos de antemão e os resultados a serem produzidos em função desses parâmetros (ver figura 3.13 c)).

Os dados para quantificação de materiais neste módulo não são os ideais para um quadro final de quantidades, uma vez que não produz informação relativa a comprimentos ou número uniforme de varões para nenhum dos elementos barra.

Os resultados em pilares já não são tão expressivos e até podem ser considerados como sendo de interpretação confusa.

Tabela 3.5 - Resultados de armaduras longitudinais e transversais necessárias (Pilar MEF e Pilar EFB)

| Bar | Required reinforcement along b (cm ²) | Reinforcement along b - distribution | Required reinforcement along h (cm ²) | Reinforcement along h - distribution | Design moment My (kNm) | Design moment Mz (kNm) | Design force N (kN) | Design force Qy (kN) | Design force Qz (kN) | Transversal reinforcement - type/distribution |
|-----|---------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | 1,12 | 2f12 | 0,62 | 2f12 | -26,81 | -24,61 | 179,91 | 6,15 | -6,15 | 2f8 30*20.0 |
| 10 | 2,35 | 3f12 | 1,32 | 2f12 | -35 | -32,8 | 179,91 | 8,2 | -8,2 | 2f8 30*20.0 |

No cálculo, o módulo considera todos os esforços atuantes, sejam de flexão, corte ou axiais, mas os resultados não são, muitas das vezes, aplicáveis a uma solução real, isto porque o número de varões atribuído pode não ser suficiente para cumprir as regras mais simples, como garantir um varão em cada canto do pilar ou ter uma redução do espaçamento entre cintas nas armaduras transversais junto aos nós dos pilares.

Para painéis as informações disponibilizadas pelo módulo podem ser confusas de interpretar, isto porque são apresentadas soluções para cada nó da malha EF do painel. Este define um número de varões e o espaçamento necessário entre os mesmos para cada elemento da malha, sempre em função dos parâmetros previamente definidos. O *software* usa o método *Wood&Armer* para definição dos esforços de flexão em painéis; este método encontra-se exposto no Apêndice 2, ponto A.2.8 – Armadura em Lajes, do EC2 e baseia-se na determinação de um momento equivalente através da adição de momentos xy aos momentos x e aos momentos y atuantes (uma descrição mais completa do método pode ser encontrada na obra, de R.H. Wood, "*The reinforcement of slabs in accordance with a pre-determined field of moments*").

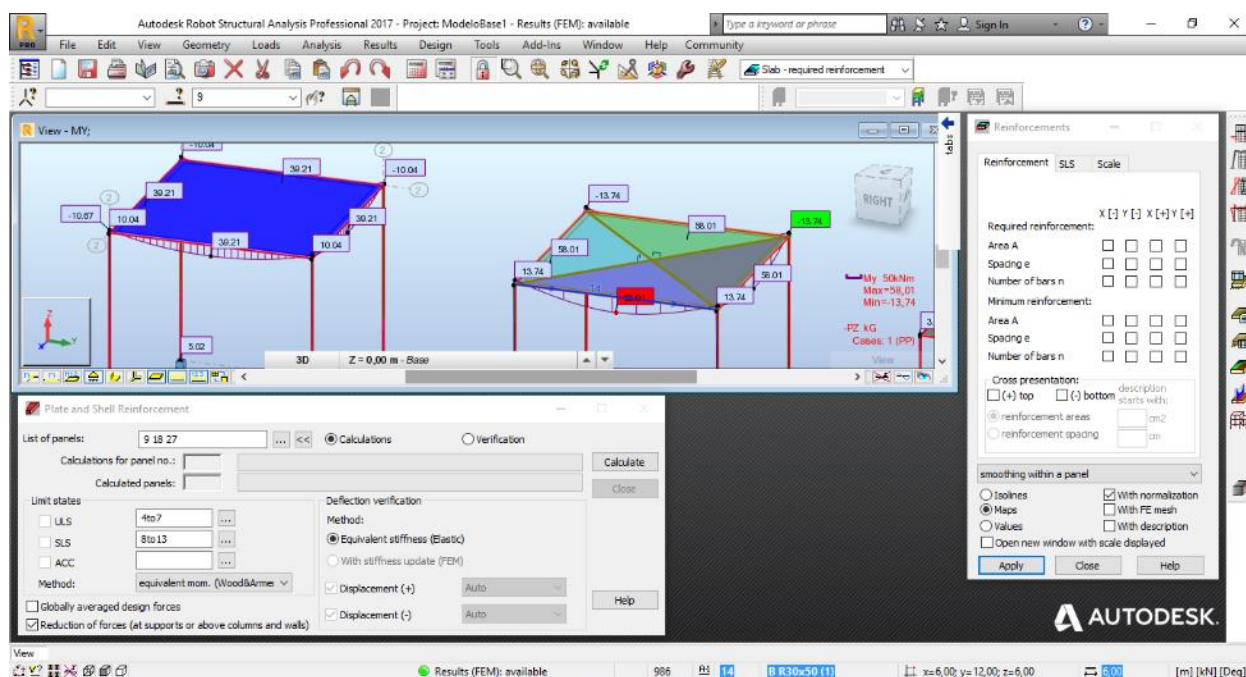


Figura 3.20 – Layout da interface para cálculo do *required reinforcement* para painéis em B.A.

Já foi abordado o tipo de resultados gerado. Como estes são extensos é somente apresentado o resultado para o nó mais condicionante. A deformação (*deflection*) é calculada por um algoritmo que assume as deformações reais como iguais ao produto das deformações elásticas e do rácio da rigidez elástica sobre a equivalente. A rigidez equivalente é calculada tendo em conta a hipótese de secção fendilhada.

Tabela 3.6 – Resultados de armaduras longitudinais em painéis

| Panel/ Node | [-]Ax Main (cm2/m) | [-]Ay Perpendicular (cm2/m) | [+]Ax Main (cm2/m) | [+]Ay Perpendicular (cm2/m) | [-]e(Ax) (cm) | [-]e(Ay) (cm) | [+]e(Ax) (cm) | [+]e(Ay) (cm) | [-]n(Ax) | [-]n(Ay) | [+]n(Ax) | [+]n(Ay) | [+]Deflection (cm) | [-]Deflection (cm) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 9/552 | 9,36 | 10,52 | 3,44 | 3,44 | 8,4 | 7,5 | 22,8 | 22,8 | 12 | 14 | 5 | 5 | 0 | -2,9 |

Concluindo este módulo, todas as informações e cálculos podem ser úteis para ter uma estimativa das necessidades de armadura e para um pré-dimensionamento estrutural, mas os dados fornecidos são

escassos e nem sempre próprios para uma solução final de armadura e/ou para quantificar ou estimar custos.

Já foi referido que este programa possui um módulo para criação de armaduras tridimensionais, o *Provided Reinforcement*, é neste módulo que é possível definir todos os princípios materiais, geométricos e técnicos para definição e/ou personalização da armadura num dado elemento, gerar notas de cálculo e desenhos técnicos com quantidades e modelos de armadura BIM.

A apresentação deste módulo é feita de modo semelhante ao anterior com o caso de estudo 1 a servir de exemplo de teste à demonstração das capacidades do programa. Em anexo é feita a aplicação deste módulo ao caso de estudo 2 para demonstrar a aplicabilidade deste *software* a casos reais.

Em primeiro lugar, para ser possível executar o *Provided Reinforcement of RC Elements* é necessário seleccionar os elementos que desejamos armar, sejam vigas, pilares, paredes ou lajes. Após a seleção dos elementos e do módulo, o programa vai abrir janelas para escolha das combinações de dimensionamento e de seguida faz um dimensionamento base em função de definições *standard*. O programa é, inclusive, capaz de reconhecer os nós com apoios e criar sapatas de fundação genéricas. Estas soluções, com excepção das lajes, mesmo com as opções de classe estrutural e de exposição definidas no *required reinforcement*, são dimensionadas sem nenhuma dessas decisões em mente, pelo que é necessário reintroduzir a grande maioria dos dados.

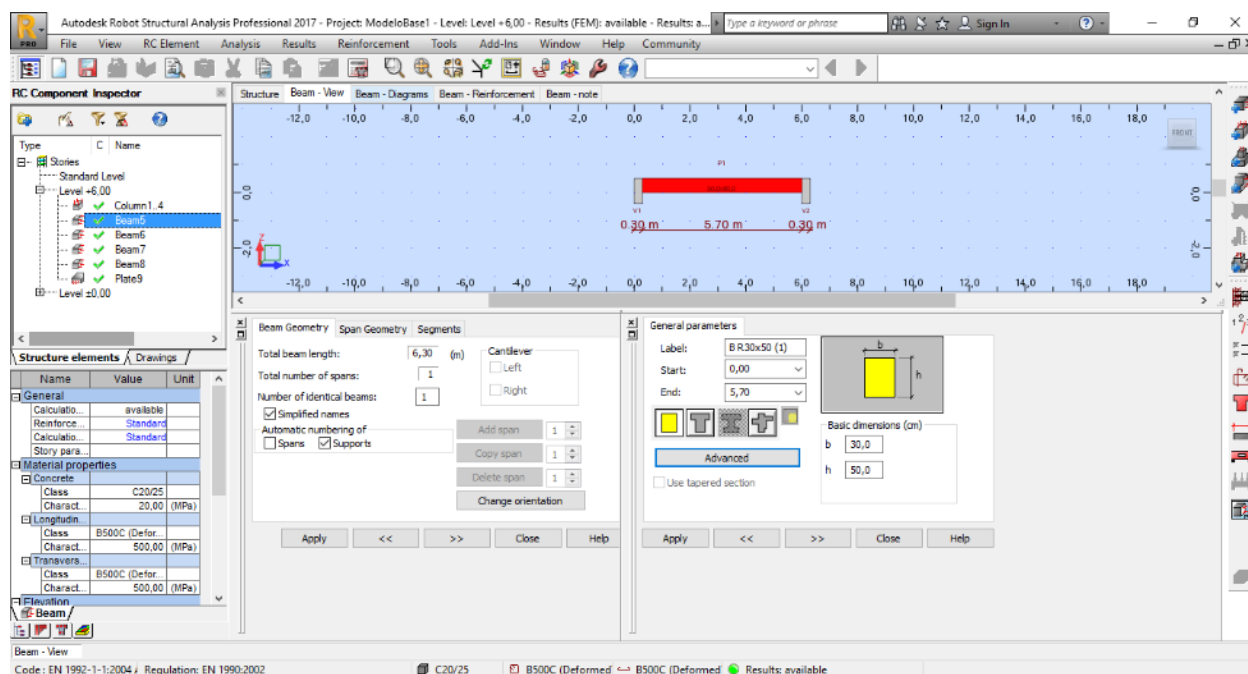
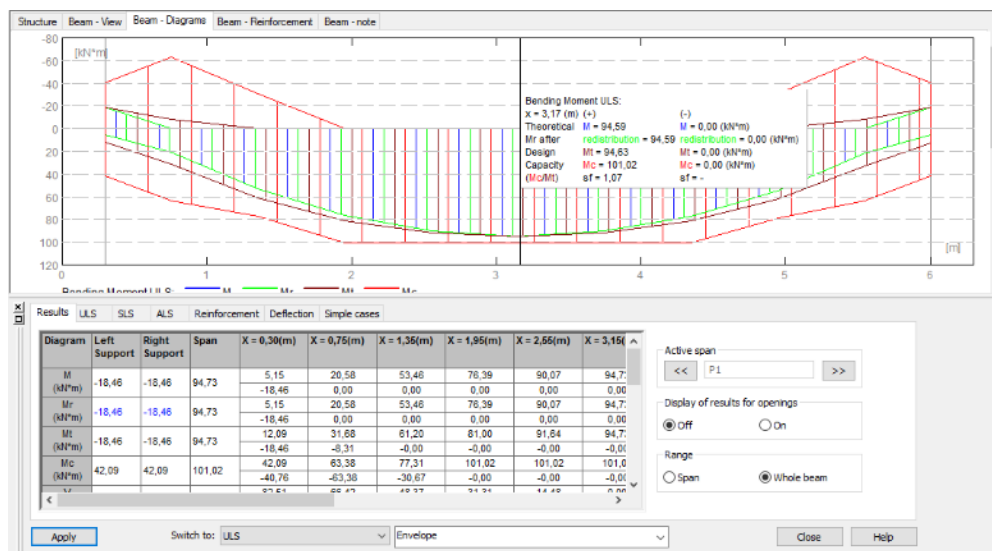


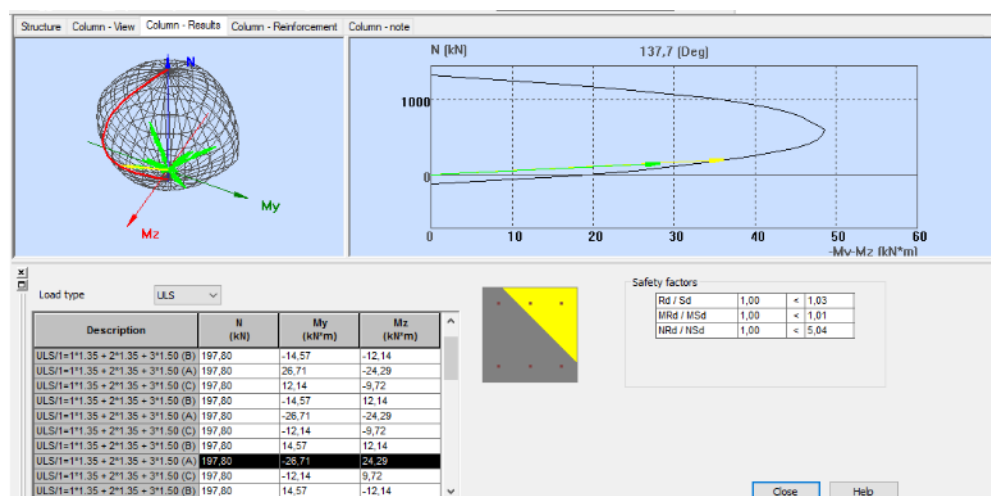
Figura 3.21 – *Layout* da interface do *provided reinforcement* para vigas

Na figura 3.21 é apresentado o *layout* base da interface, mas este altera dependendo da opção ou do tipo de elemento seleccionado. O que é visível na figura mencionada é o que é apresentado caso o elemento seja uma viga. A opção observável exhibe os menus para definição do vão, ou vãos, e da geometria da

secção da viga em estudo, dentro desse tipo de elemento ainda é permitido optar pela visualização dos diagramas, do dimensionamento ou aceder às notas de cálculo. Em pilares e fundações os menus são quase idênticos com a diferença a ser notada na janela referente aos diagramas mudando ainda a forma como é efetuada a análise e o título da janela que passa a designar-se “Resultados”.



a) Diagramas em Vigas



b) Resultados em Pilares

Figura 3.22 – Análise de resultados de dimensionamento de armaduras em elemento barra em Robot

A quantidade de parâmetros editáveis, para ter um dimensionamento à medida das necessidades do projeto, são imensos e colocá-los todos neste relatório seria inviável. Alguns dos parâmetros, como a definição dos modos de encurvadura, classe de exposição, tipo de aço e método de cálculo, são iguais aos que já foram discutidos na opção de *required reinforcement*. Este módulo apresenta no entanto novas opções e novos modos de abordagem ao dimensionamento. Por exemplo, em pilares o cálculo está pré-definido para fazer um dimensionamento tendo apenas em conta os esforços de flexão em conjunto com

os esforços de compressão, mas é possível pedir ao programa para ter em conta os esforços transversos, assim como nas vigas é possível pedir para ter em consideração a torção.

No que respeita os pormenores relacionados com as disposições construtivas, o *software* tem a possibilidade de considerar disposições relativas a necessidades de reforço sísmico segundo o EC8, ataque por fogo segundo o EC2 parte 1-2 ou ainda ter uma otimização do elemento, seja através da adaptação da armadura ou através da alteração da geometria da peça atingindo uma solução capaz de suportar todas as limitações regulamentares e garantir a segurança estrutural da forma mais económica. Se a solução gerada ainda não tiver a configuração desejada é possível, através de uma ferramenta que também se encontra disponível para Revit, gerar uma solução personalizada e de seguida realizar a verificação da solução.

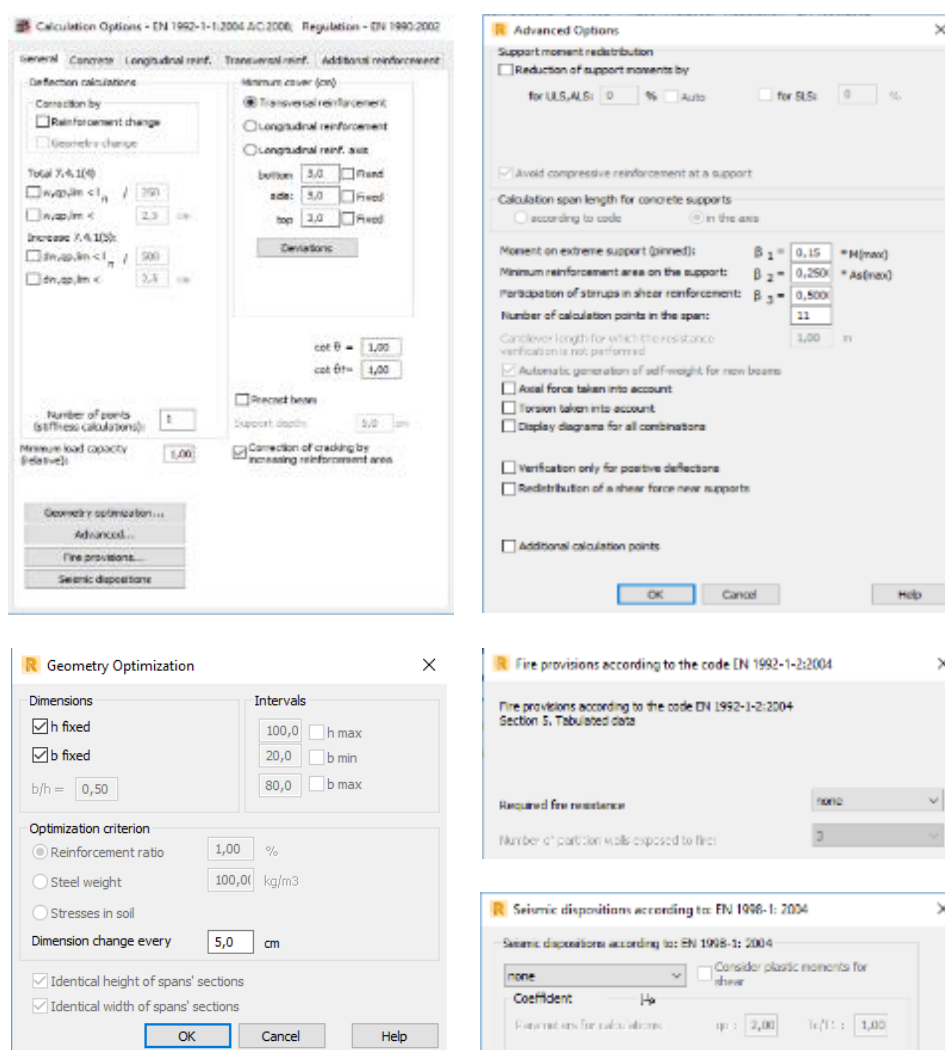
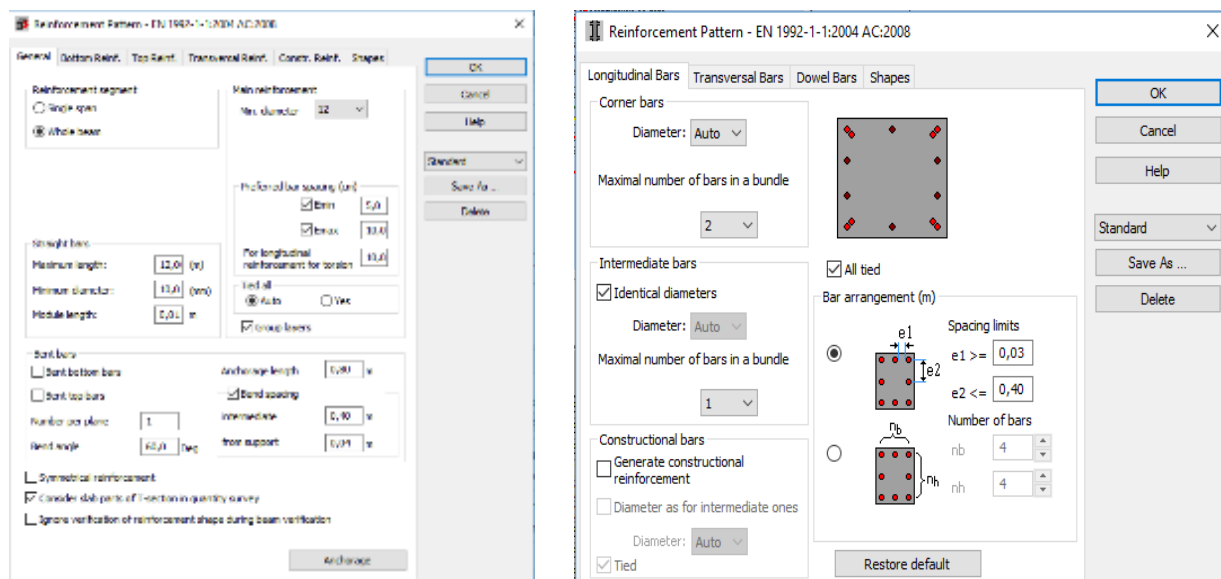


Figura 3.23 – Opções de cálculo gerais para vigas

Na figura 3.23 são exibidos os parâmetros gerais, mas ainda existem opções para edição do tipo de betão, aço e gama de varões que podem ser considerados no dimensionamento. A classe de exposição e a idade do betão são definidos nos *Story Parameters* (parâmetros do piso/andar).

Outro menu relevante é o que apresenta opções de edição dos padrões de armadura a aplicar no dimensionamento.



a) Vigas

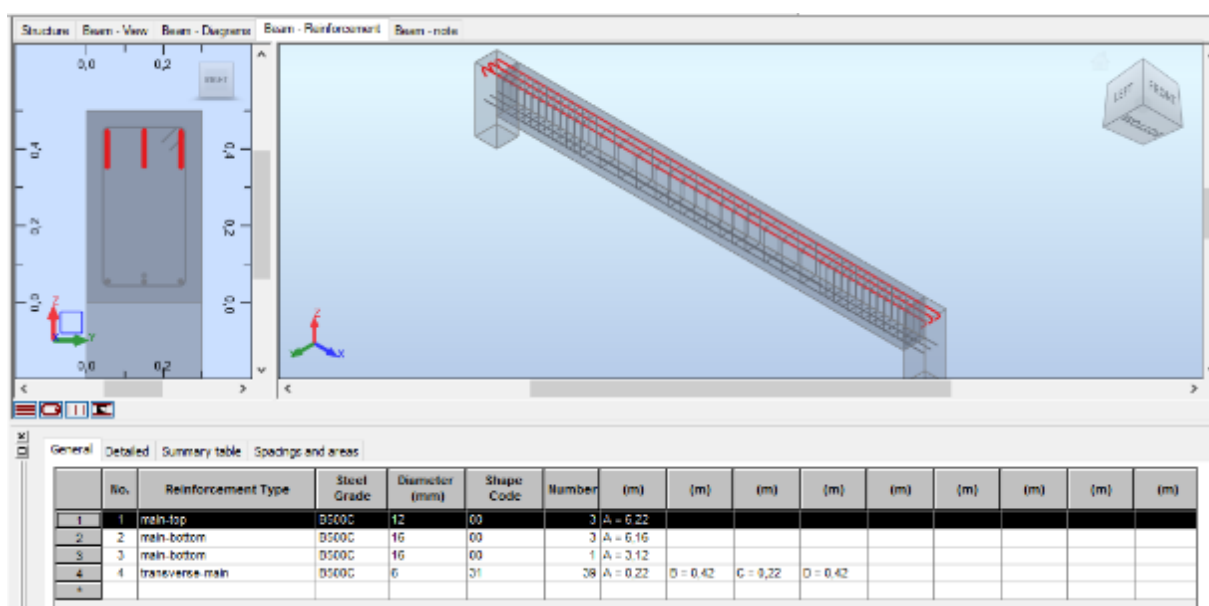
b) Pilares

Figura 3.24 – Menu *Reinforcement Pattern* do Robot

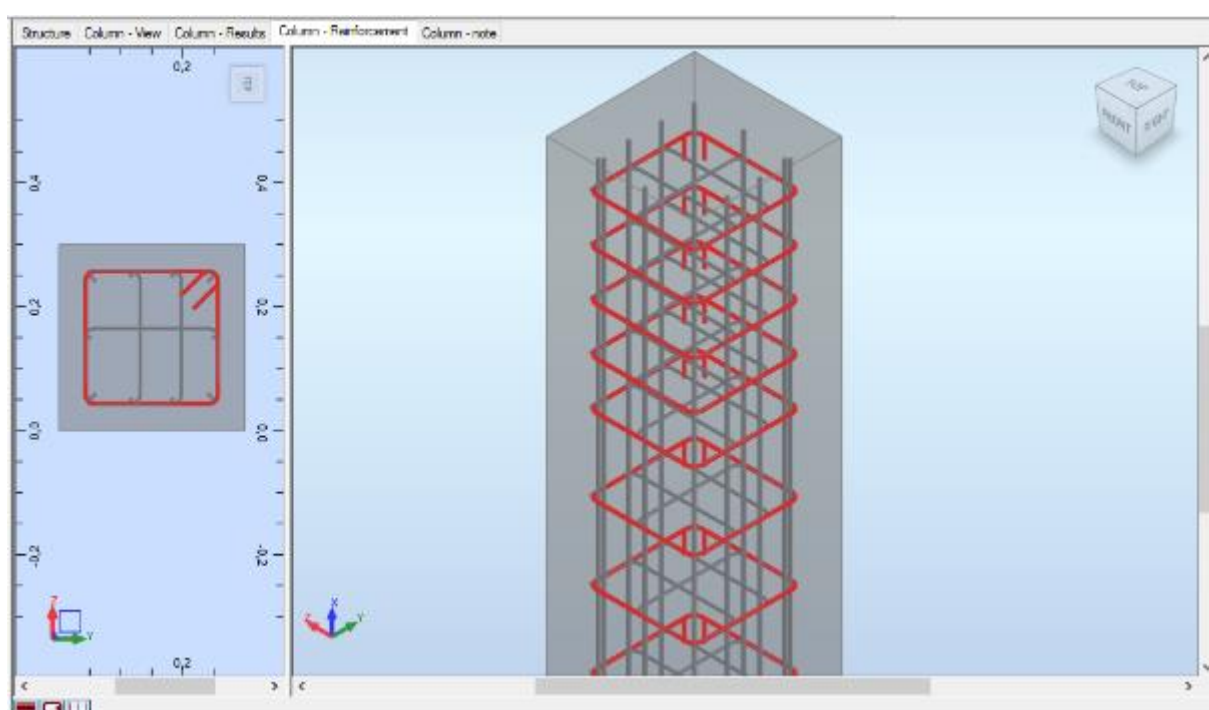
Em vigas define-se o comprimento máximo dos varões, os diâmetros mínimos de armadura, comprimentos de amarração, ângulo dos ganchos, número de linhas de armaduras ao longo da peça, etc. Em pilares estão disponíveis as mesmas opções, com a possibilidade de alterar os limites de espaçamento máximo entre varões e definir qual o método de amarração das armaduras de espera num dado nó. É ainda possível modificar as formas dos varões desde que se possua as bibliotecas necessárias.

O último menu relevante para o tema é o *Typical Reinforcement*. Este é o menu é praticamente idêntico ao de uma extensão para Revit, que permite modelar as armaduras em função de um conjunto de *inputs* que devem ser previamente definidos. É a ferramenta a utilizar caso a solução definida pelo programa, solução alcançada após a definição de todos os parâmetros, não seja apropriada para execução em obra.

O programa não faz o arredondamento de comprimentos de amarração e/ou nem sempre aplica uma solução de estribos com um espaçamento fácil de executar em obra. É por isso interessante o consentimento do *software* à criação de uma solução personalizada.



a) Vigas



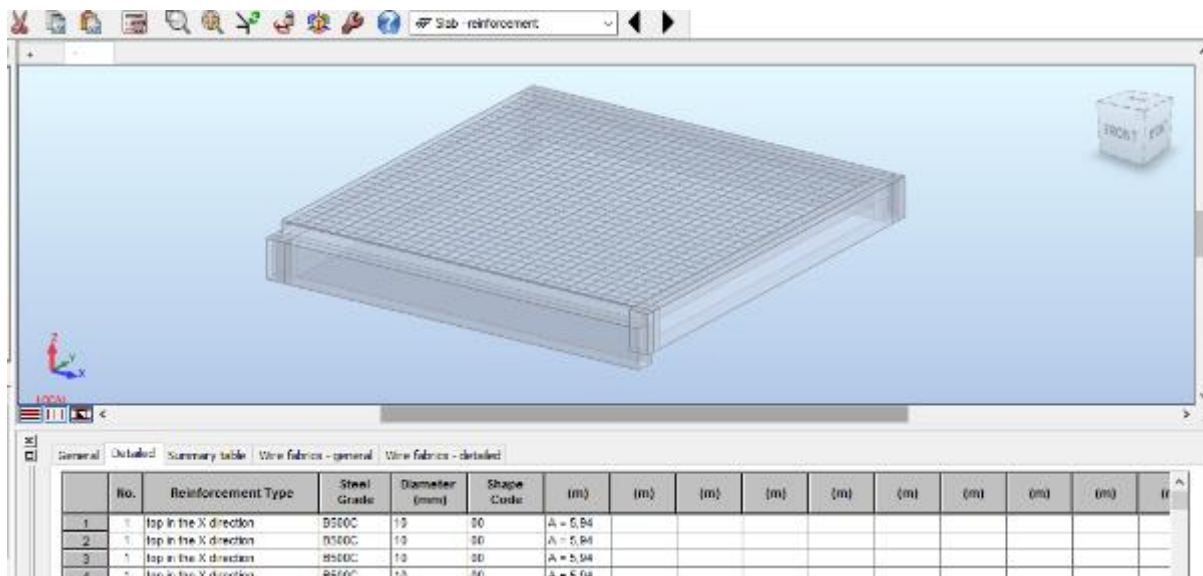
b) Pilares

Figura 3.25 – Exemplos de modelação de armaduras em vigas e pilares do Caso de Estudo 1

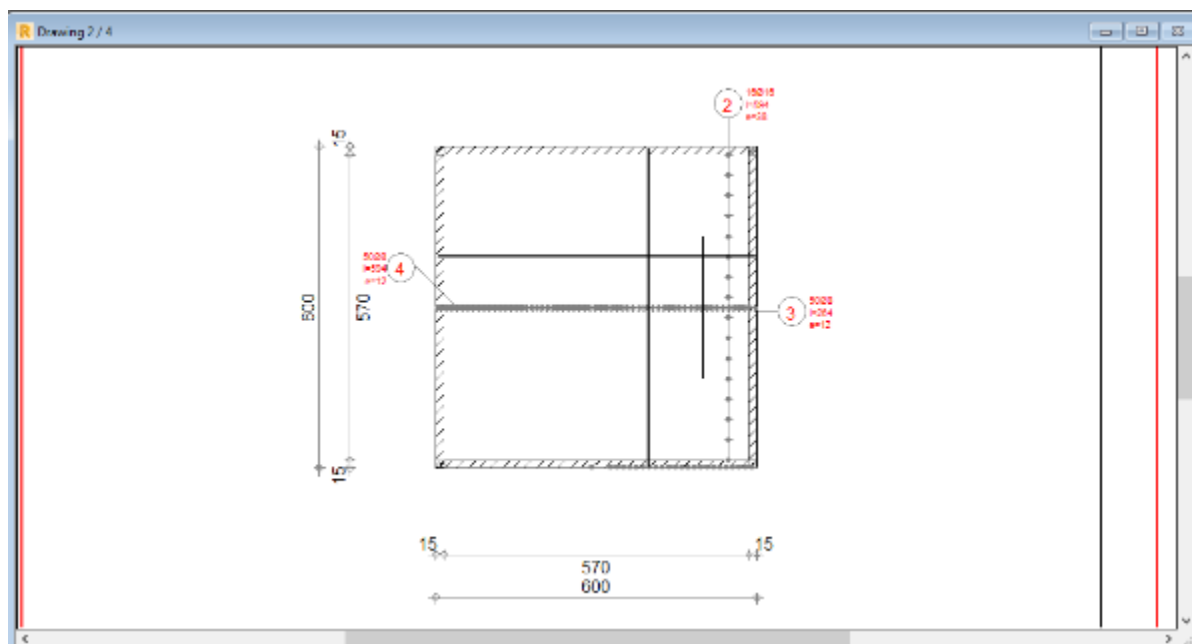
Os exemplos da figura 3.25 são modelos de armaduras criados automaticamente, sem qualquer alteração de parâmetros de cálculo ou construtivos. Este exemplo serve principalmente para demonstrar as capacidades de modelação.

Em lajes o módulo é de aplicação menos simples e menos prática. A edição de dados fica limitada pelos parâmetros de cálculo definidos para o cálculo do *required reinforcement* e os resultados apesar de serem

melhores em termos de mapa de quantidades e notas de cálculos, não apresentam modelos de armaduras nem desenhos com qualidade suficiente para serem úteis num modelo BIM ou para uso técnico em obra.



a) Modelo 3D de armaduras numa laje



b) Desenho técnico das armaduras da face inferior de uma laje

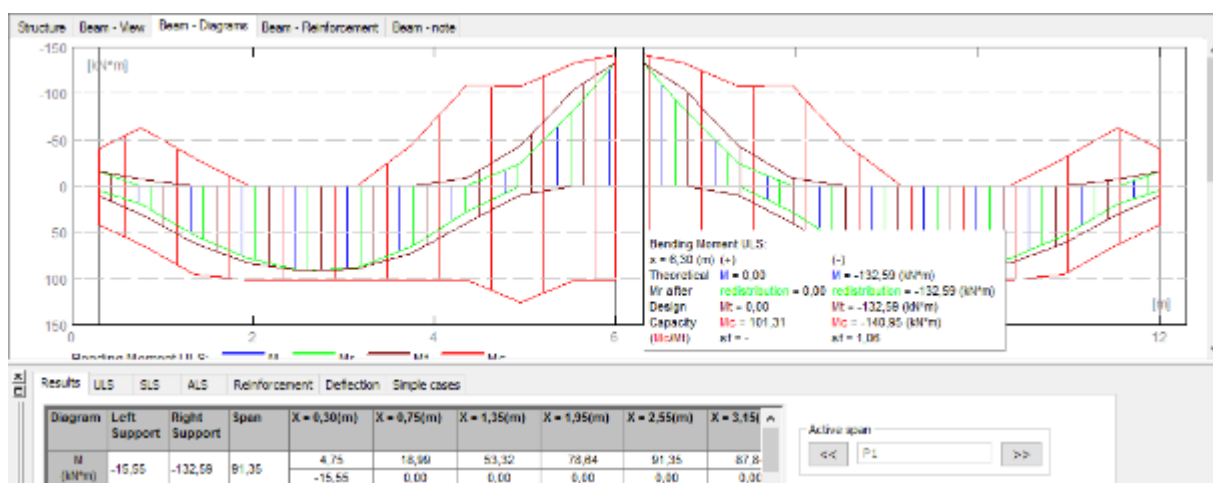
Figura 3.26 – Exemplo de modelação e desenho para lajes em Robot

Como principal limitação deste módulo, realça-se o facto de que os modelos de armadura gerados só ficam visíveis no módulo, ou seja, não é possível visualizar os modelos tridimensionais no modelo global da estrutura, para isso é necessário fazer a integração do modelo em Revit. O programa já possui uma opção de integração onde é possível enviar para Revit, além do modelo estrutural e das armaduras, os esforços e todos os elementos analíticos criados em Robot.

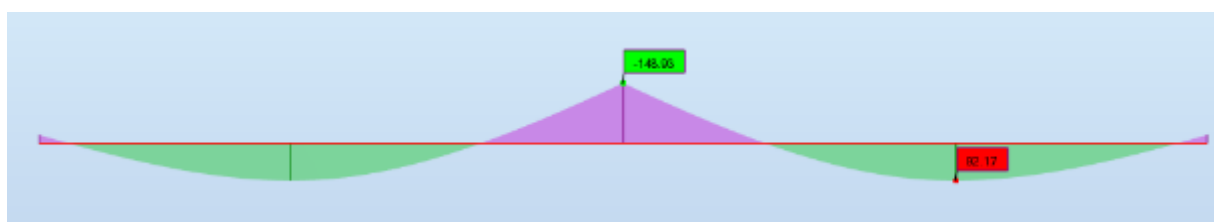
A interoperabilidade Robot Structural Analysis/Revit é estudada no ponto 3.3.1.

As principais vantagens do uso destes módulos estão nas opções de cálculo e detalhes construtivos que o programa é capaz de considerar no dimensionamento de elementos de betão armado, principalmente no dimensionamento de elementos de barra. Em painéis ainda existem lacunas na apresentação de dados e modelos, algo que pode ser eliminado com o evoluir das capacidades do programa.

As desvantagens deste *software* estão na facilidade em cometer erros de modelação, principalmente na criação de elementos casca, e em alguns pormenores dos módulos de dimensionamento onde é preciso ter maior atenção. O principal pormenor respeita aos resultados dos diagramas no módulo de *provided reinforcement*. No dimensionamento de vigas o programa tem a particularidade de só considerar os esforços até à face do apoio, mesmo que se trate de uma viga contínua ou de um encadeamento de vigas.



a) Diagramas de esforços de flexão no modo *Provided Reinforcement*



b) Diagramas de esforços de flexão no modo *Diagrams for Bars...*

Figura 3.27 – Comparação entre resultados de flexão de diferentes módulos em Robot

Como se pode ver na figura 3.27, os valores atuantes no módulo de dimensionamento são diferentes dos valores atuantes seguindo uma análise com a ferramenta *Diagrams for Bars...* e sempre pelo lado da insegurança. A redução do valor de flexão no apoio é admissível, mas apenas se considerarmos uma redistribuição de parte desse valor para o interior do vão. Uma vez que o programa não faz essa redistribuição o processo de dimensionamento fica desde logo exposto a sérios riscos. Se for pedido para fazer uma redistribuição o programa vai redistribuir os momentos à face do apoio, o que continua a ser

Além dos desenhos técnicos, existem as notas de cálculo de cada elemento dimensionado que dispõem de informações sobre os dados de cálculo e o levantamento de materiais. Esse levantamento possui dados sobre o volume da peça, área necessária para a cofragem e a totalidade de elementos de aço categorizados segundo o seu tipo, comprimento e diâmetro.

Structure

Column - View

Column - Results

Column - Reinforcement

Column - note

2.5.2 Reinforcement:

Real (provided) area

Asr = 3,02 (cm2)

Ratio:

$\rho = 0,34 \%$

2.6 Reinforcement:

Main bars (B500C):

- 6 ϕ 8 l = 6,21 (m)

Transversal reinforcement: (B500C):

stirrups:

42 ϕ 6

l = 0,98 (m)

pins

42 ϕ 6

l = 0,37 (m)

3 Material survey:

- Concrete volume = 2,07 (m3)
- Formwork = 27,60 (m2)
- Steel B500C
 - Total weight = 109,13 (kG)
 - Density = 52,72 (kG/m3)
 - Average diameter = 6,8 (mm)
 - Reinforcement survey:

| Diameter | Length (m) | Weight (kG) | Number (No.) | Total weight (kG) |
|----------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| 6 | 0,37 | 0,08 | 168 | 13,84 |
| 6 | 0,98 | 0,22 | 168 | 36,46 |
| 8 | 6,21 | 2,45 | 24 | 58,83 |

Figura 3.29 – Nota de cálculo para um conjunto de pilares em Robot

Os desenhos já apresentam tabelas com algumas das informações disponíveis no levantamento feito, tal como os comprimentos dos diversos segmentos de um dado varão ou cinta. É ainda possível alterar alguns dos parâmetros dos desenhos, como o *template* com o formato de apresentação/localização dos perfis longitudinais e transversais da peça, assim como das tabelas de materiais, ou ainda as escalas e a formatação das linhas, cor e peso.

O ficheiro da nota de cálculo pode ser gravado em formato .RTF (*Rich Text Format*), formato legível pela grande maioria dos processadores de texto existentes¹.

Se o utilizador quiser algo na ordem de uma folha de cálculo, para realizar um tratamento de dados em MS-Excel ou noutro programa semelhante, basta aceder a qualquer peça na área de *provided reinforcement*, seleccionar a opção *Reinforcement Table* e com o botão direito do rato escolher *Conversion to EXCEL (CSV) Format*.

A definição de custos em Robot parece limitada uma vez que permite definir preços para elementos, dividindo os preços por categoria de fabrico, transporte e proteção, mas apenas para o tipo de secção e em função do peso ou do volume total associado a essa mesma secção. Não é possível definir preços para varões isolados.

¹ Informação disponibilizada pela Microsoft, responsável pelo formato.

3.2.2 PAC Pórticos

Iniciando aqui uma viagem no tempo, voltamos ao ano de 1991, ano em que a empresa NEWTON – Consultores de Engenharia criou o seu próprio *software* de análise e cálculo estrutural. O PAC – Pórticos, Projeto de Pórticos Assistido por Computador, é um programa de cálculo desenvolvido com o intuito de facilitar a conceção e o estudo de estruturas reticuladas, isoladas ou integradas em edifícios, obter soluções de confiança e reduzir o tempo de projeto despendido em iterações de cálculo na busca de uma solução mais económica.

O programa foi desenvolvido por especialistas nos domínios do cálculo automático, estruturas de betão e engenharia sísmica sobre uma plataforma MS-DOS, *MicroSoft Disk Operating System*. Sistema operativo desenvolvido até 1995 pela *Microsoft* e que atualmente se encontra em desuso dada a evolução dos sistemas operativos. Os equipamentos informáticos pós *Windows 98* possuem ferramentas de origem com ligação ao formato DOS mas de forma restringida, sendo o acesso livre a este tipo de formato disponibilizado através de emuladores como o DOSBox, pode é não ser possível aceder a totalidade dos conteúdos do ficheiro ou programa dada a possibilidade de algumas funções nativas do formato DOS não estarem implementadas no emulador. Por essa razão e devido às restrições de segurança que a própria instalação do programa impõe ao *hardware*, impossibilidade de proceder a alterações de registo por exemplo, o teste ao *software* foi feito num computador da empresa com capacidades para dar uso ao conjunto total de funções disponíveis no programa. Estas funções e procedimentos de cálculo foram alvo de atualizações ao longo dos anos, seja por parte dos autores originais, ou através do contributo pontual de alguns estudantes em programa de estágio semelhante ao que foi realizado para a redação deste relatório.



a) Hardware

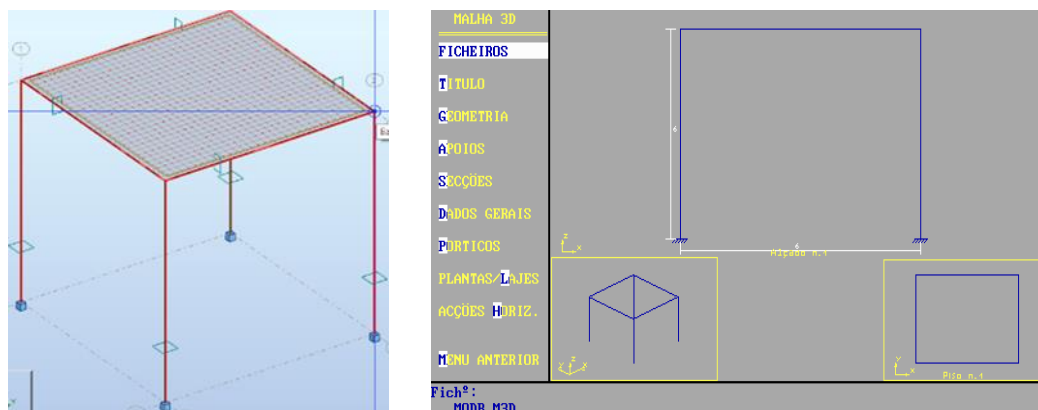


b) Interface de abertura (Raúl Sousa, 2015)

Figura 3.30 – Apresentação do PAC – Pórticos

Apesar de o programa ser de 1991, este tem a capacidade de simular um ambiente tridimensional da estrutura, sem o mesmo tipo de liberdade de visualização que o Robot, por exemplo, mas o suficiente

para ter uma representação semelhante e dar ao utilizador uma percepção aprimorada da constituição global da estrutura.

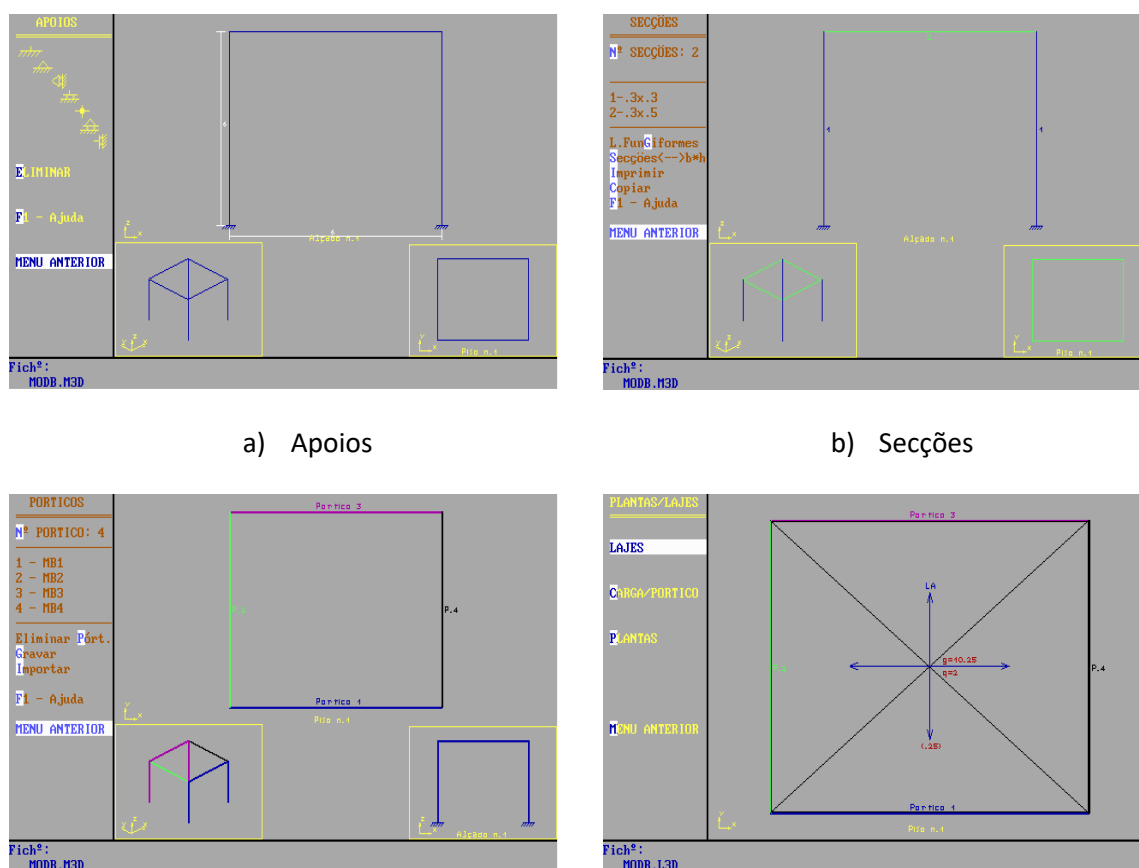


a) Robot

b) PAC – Pórticos

Figura 3.31 – Comparação entre a interface de apresentação de modelos estruturais

O menu da figura 3.31 b) é o que permite definir toda a composição estrutural, desde a grelha para introdução de elementos, apoios, secções dos elementos barra, pórticos, lajes, etc.



a) Apoios

b) Secções

c) Pórticos

d) Lajes

Figura 3.32 – Menus de caracterização estrutural

Este é um programa de cálculo de estruturas lineares pelo método dos deslocamentos, em que uma distribuição por pórticos deve ser feita para que exista uma compatibilização da estrutura com todo o tipo de ações que possam atuar sobre a mesma, principalmente ações horizontais.

Por exemplo, no caso de estudo 2 a laje dos pisos do edifício administrativo é do tipo fungiforme e para garantir uma coesão do modelo foi necessário criar um conjunto de pórticos onde a ligação entre pilares é feita recorrendo a vigas de simulação da laje, com secção de um metro de largura pela espessura da laje.

A definição de secções em PAC está por defeito para secções retangulares, mas permite qualquer tipo de secção através da introdução da área e da inércia e no momento da criação da secção é definido o seu módulo de elasticidade. A simulação de elementos parede, faz-se através de elementos de barra equivalentes o que resulta em valores idênticos a formulações mais avançadas com elementos finitos ou outras. O dimensionamento do PAC está preparado para vigas e pilares.

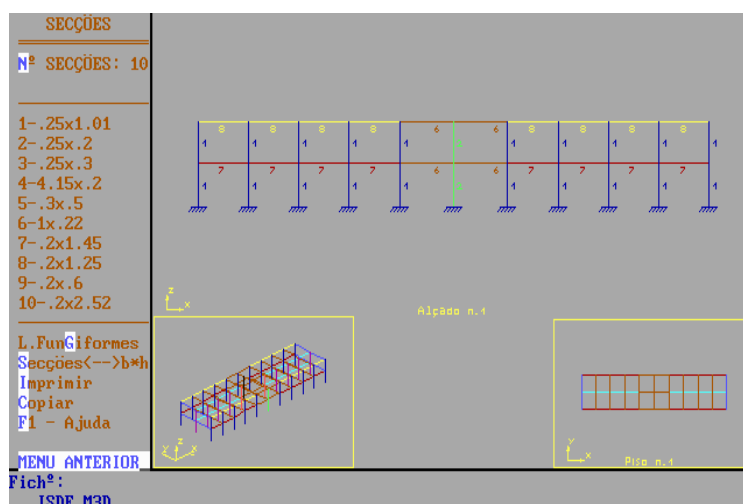


Figura 3.33 – Criação de secções – Simulação de Paredes e vigas de compatibilização de pórticos

A definição de pórticos é uma obrigatoriedade do programa e este permite uma análise individual de cada pórtico na fase de análise e dimensionamento ou uma análise global automática. Como em qualquer programa deste tipo, é aconselhável proceder a simplificações do modelo que passam por não incluir, no modelo, elementos que são primariamente de arquitetura, ou elementos, que apesar de relevantes, possam ser demasiado complexos para serem integrados no modelo global.

Em Robot já não existe essa limitação e por isso existe uma grande disparidade entre os modelos PAC e Robot, com o modelo PAC a não ter na sua composição os pilares de fachada de menor secção e a caixa do elevador a ser ignorada dada a complexidade que a sua inclusão importaria ao modelo. Todas estas alterações acabam por prejudicar o modelo afastando-o dos resultados desejados.

Em lajes, o PAC tem a possibilidade de criar uma laje maciça e definir à partida se queremos a laje armada numa ou duas direções, mas com a opção de ter a laje a descarregar para dois, três ou quatro bordos. O

programa da *Autodesk* não precisa deste tipo de definição uma vez que já consegue reconhecer automaticamente os percursos de descarga e possui algumas técnicas para alteração de parâmetros físicos dos painéis para ser capaz de reproduzir funcionamentos distintos, como aligeiramento ou funcionamento numa só direção independentemente do tipo de apoio. Esta necessidade do PAC de definir os percursos de carga foi uma alternativa inteligente e uma forma de contornar algumas limitações da altura, dando ao utilizador o poder de decisão e uma maior liberdade de modelação. Ao contrário do procedimento para inserção de cargas e sobrecargas em pórticos, como é visto mais à frente, ao definir uma laje também é pedido ao utilizador para introduzir as cargas e sobrecargas atuantes no piso.

Esta modelação, comparada aos programas que hoje em dia dominam o mercado, é bastante limitada, mas tendo em conta a plataforma, as possibilidades de interação da estrutura, a representação muito próxima do 3D atual (com a representação dos diversos tipos de secção por cor), a possibilidade de criar estruturas mais complexas (dependente da experiência do utilizador), a leveza do programa e a rapidez de execução de todas as suas funções tornam-no numa referência nacional e num *software* incrivelmente versátil.

Para ser efetuado o dimensionamento é necessário passar por diversos pontos, algo que o PAC organiza de um modo bastante simples.

| DADOS GERAIS | DADOS/VIGAS | DADOS/PILARES |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Betão : B 25 | Recbr.Sup:..02 | Mobilidade: |
| Aço : A 400 | Recbr.Inf:..02 | Nós Móveis |
| Saída Result. | 1- YminSup:10 | Esf.Dir.Transv |
| Geometria [X] | 2- YminInf:10 | Nº Pilares:0 |
| Cargas [X] | Passo/Diam:1 | |
| Deslocament[X] | Redst.Cen:..9 | MENU ANTERIOR |
| Esforços [X] | Redst.Ext:..9 | |
| Reacções [X] | Espess.Lajes: | |
| Nº Acções : 0 | Piso 1: 0 | |
| Nº Combin.: 0 | MENU ANTERIOR | |
| Dados/Vigas | | |
| Dados/Pilares | | |
| MENU ANTERIOR | | |
| Fichº: TEST.M3D | Fichº: TEST.M3D | Fichº: TEST.M3D |

Figura 3.34 – Parâmetros para dimensionamento de vigas e pilares

Todos os passos necessários para chegar ao dimensionamento estão organizados de forma quase linear. Começando com a modelação e caracterização geométrica, seguindo pela definição de materiais e parâmetros de cálculo, depois a análise e por fim o dimensionamento. Seguindo sempre a ordem dos menus visíveis na figura 3.30 b), no menu dados, além da configuração da estrutura, das secções e lajes, definem-se também os parâmetros para cálculo de armaduras. Definição do tipo de betão, aço, espessura de recobrimento e diâmetro mínimo dos varões são algumas das opções disponíveis. Também é no menu de *Dados* que são definidos os parâmetros base das ações horizontais, com a seleção do tipo de

rugosidade, zona e cota do nível térreo para definição da ação do vento e a definição das cargas gravíticas por piso a considerar no cálculo das ações sísmicas.

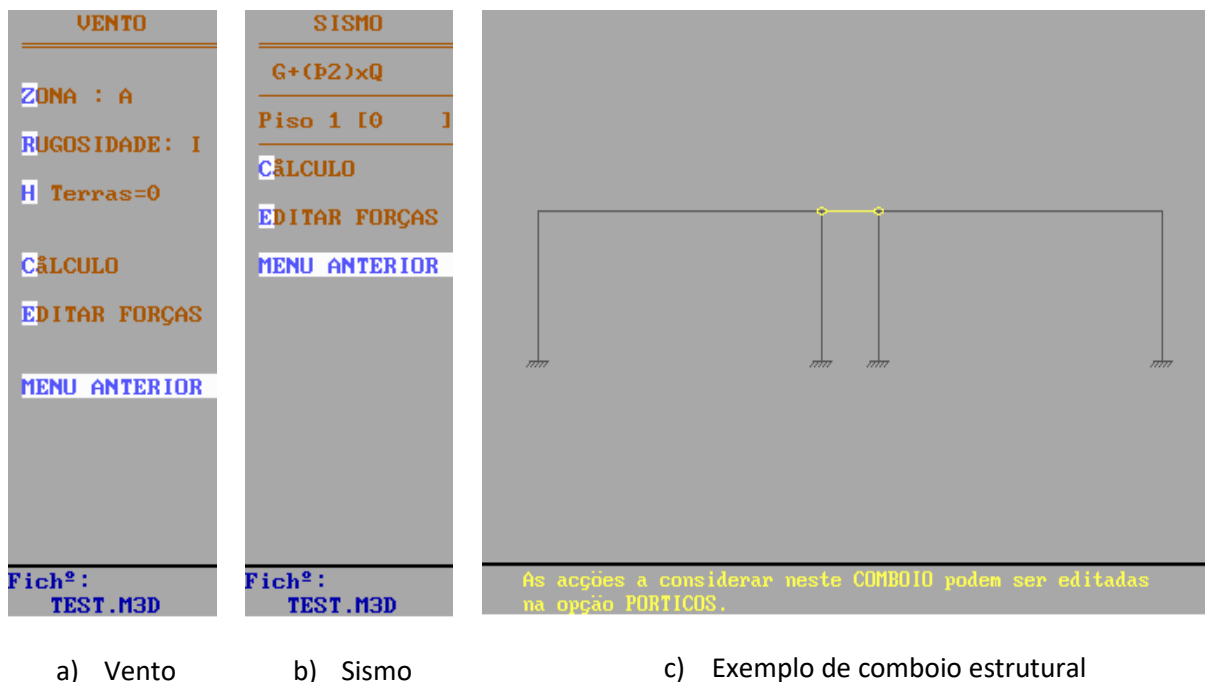


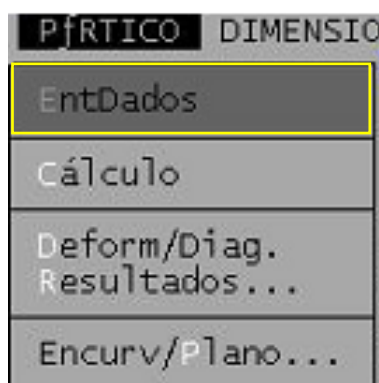
Figura 3.35 – Parâmetros base para cálculo de ações horizontais

A figura 3.35 c) demonstra um exemplo de comboio estrutural utilizado pelo programa para cálculo das ações horizontais sobre a estrutura. Este tipo de comboio só pode ser determinado após a definição de todos os pórticos da estrutura. O cálculo final é feito em função dos parâmetros estabelecidos.

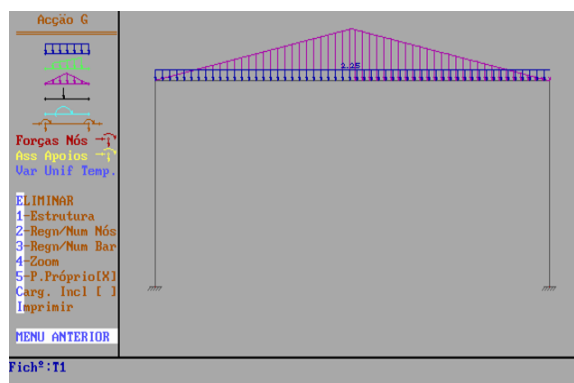
O cálculo das ações sísmicas não foi testado, mas o programa tem capacidade para determinar as ações dinâmicas para a globalidade da estrutura considerando três graus de liberdade por piso. A análise dinâmica é efetuada segundo o método de Rayleigh e os espectros de resposta são os que estão previstos no RSAEEP. O vento também pode ser analisado segundo o modelo tridimensional, mas a análise efetuada é do tipo estático. Uma limitação que o programa tem é a incapacidade de equilibrar ações horizontais em estruturas de um só piso.

Como no Robot também não foram consideradas ações horizontais para o caso de estudo 1, e no caso de estudo 2 as disparidades para com o modelo Robot são tão grandes que a comparação entre os dois é praticamente impossível, resultando que a análise a este tipo de ações acabou por não ser explorada em detalhe.

O tratamento dos pórticos é feito no menu homónimo. Neste menu são introduzidas as cargas adicionais, sobrecargas, são criadas as combinações e é disponibilizada a análise dos diversos pórticos previamente definidos.



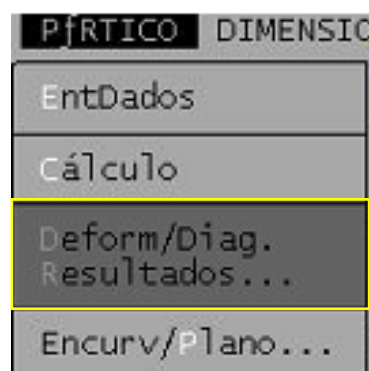
a) Entrada de dados



b) Definição de ações/cargas

| COMBINAÇÕES | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Nº COMBIN: 7 | AC. 1 | AC. 2 | AC. 3 | AC. 4 |
| 1.5G+1.5Q | 1.5 | 1.5 | 0 | 0 |
| 1.5G+1.5Q+.6W | 1.5 | 1.5 | .6 | 0 |
| 1.5G+1.5Q-.6W | 1.5 | 1.5 | -.6 | 0 |
| 1.5G+.6Q+1.5W | 1.5 | .6 | 1.5 | 0 |
| 1.5G+.6Q-1.5W | 1.5 | .6 | -1.5 | 0 |
| 1.0G+.2Q+1.5E | 1 | .2 | 0 | 1.5 |
| 1.0G+.2Q-1.5E | 1 | .2 | 0 | -1.5 |

c) Combinações (Raúl Sousa, 2015)



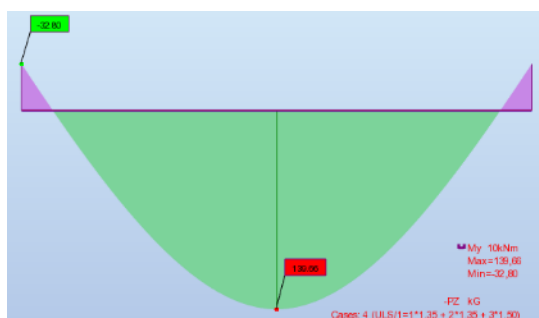
d) Entrada para interface de análise

Figura 3.36 – Menu Pórticos – opções de interação

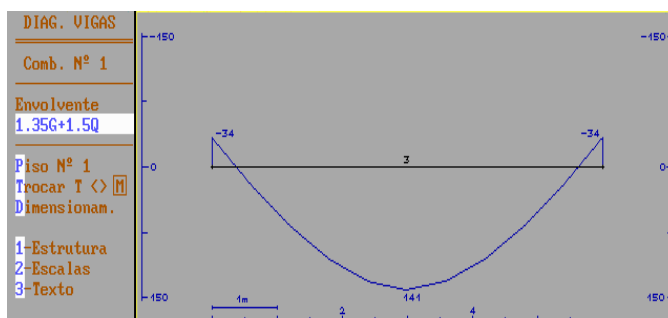
Na definição de cargas estão disponíveis várias opções de introdução de cargas. Cargas distribuídas, trapezoidais, ou pontuais são algumas dessas opções e é possível ainda entrar com as cargas associadas ao peso próprio, ou ignorá-las e seguir para a análise tendo somente em conta as cargas adicionais. É necessário definir as ações como sendo do tipo G (gravíticas) ou Q (sobrecarga) e seguidamente criar as combinações. Se tudo estiver bem definido, incluindo ações horizontais, o programa irá criar combinações com todas essas ações em conta, tendo o utilizador a opção de alterar os coeficientes de majoração para chegar às combinações pretendidas.

Resta aceder à interface inicial, seleccionar a opção *cálculo* e por fim analisar os diagramas de flexão ou de esforço transversal em cada pórtico. (Ver figura 3.36 d))

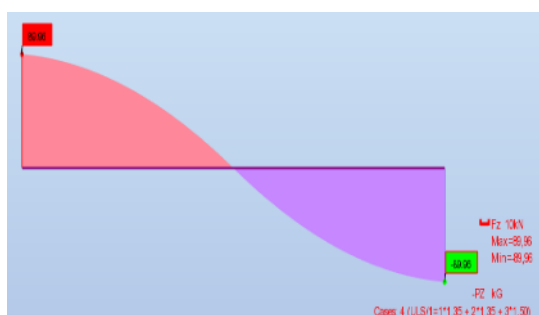
Relativamente ao método de cálculo, este é semelhante ao do Robot, se não forem introduzidas malhas de elementos finitos, com o PAC a produzir resultados ligeiramente superiores, na ordem de uma a duas unidades de força.



a) Flexão – Viga – Robot



b) Flexão – Viga – PAC



c) Transverso – Viga – Robot



d) Transverso – Viga – PAC

Figura 3.37 – Comparação de diagramas entre PAC – Pórticos e Robot Structural Analysis

Na figura 3.37 pode observar-se um exemplo dessa proximidade de resultados, com o PAC a atingir um resultado máximo a meio vão de 141 kN/m à flexão e o Robot com um resultado próximo dos 140 kN/m, nos transversos igual, com um máximo de 91 kN em PAC e 90 em Robot.

Os restantes resultados, seja no valor de deformações ou de esforços em pilares, são tal e qual o exemplo das vigas, a única diferença está na apresentação dos valores das reações nos apoios onde o PAC exhibe somente os valores referentes ao peso e às cargas sobre as vigas, não apresentando o valor do peso próprio dos pilares. É só um pormenor que requiere alguma atenção por parte do utilizador, mas que não tem qualquer efeito prático na fase de dimensionamento dos pilares, uma vez que nesse dimensionamento os valores de peso próprio já são contabilizados. Convém lembrar que o programa analisa cada pórtico individualmente e as reações apresentadas só englobam o resultado associado aos esforços atuantes nesse pórtico, não sendo possível uma visão global como em Robot.

Ainda assim nos relatórios de cálculo do dimensionamento de pilares são apresentadas reações globais do funcionamento da estrutura, até porque sem eles o programa não é capaz de realizar uma análise à encurvatura.

CALCULO DA ARMADURA DAS VIGAS DE SECCAO RECT. A FLEXAO SIMPLES

Materiais : Aço A 500 e Betão B 35
 $d1 = .04$ (m) $d2 = .04$ (m) $B \cdot H$ (cm2)
 X = Distância da secção à extremidade esquerda da barra (m)
 $As1$ = Armadura de traccao (cm2)
 $As2$ = Armadura de compressao (cm2)

| BARRA | B * H | X | Msd (KN*m) | Mred | As1 e As2 |
|-------|-------|------|------------|-------|-----------|
| 3 | 20 40 | 0.00 | -100.08 | 0.193 | 7.39 0.00 |
| 3 | 20 40 | 0.60 | 85.08 | 0.164 | 6.12 0.00 |
| 3 | 20 40 | 3.00 | -45.77 | 0.088 | 3.12 0.00 |
| 9 | 20 60 | 0.00 | -64.58 | 0.051 | 2.77 0.00 |
| 9 | 20 60 | 0.00 | 48.18 | 0.038 | 2.05 0.00 |
| 9 | 20 60 | 3.65 | -76.96 | 0.061 | 3.32 0.00 |

| BARRA | TIPO | A1 | A2 | A vao | A3 | A4 |
|--------------|------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| ARM. | | d1 | d2 | ----- | d3 | d4 |
| PISO = 1 [] | | | | | | |
| 5 | AS | 4Y16+ 0Y 0 1.65 | 0Y 0+ 0Y 0 .00 | 2Y16+ 0Y 0 ----- | 3Y16+ 0Y 0 1.85 | 5Y16+ 0Y 0 1.65 |
| | AI | 0Y 0+ 0Y 0 .00 | 0Y 0+ 0Y 0 .00 | 2Y12+ 2Y16 ----- | 0Y 0+ 0Y 0 .00 | 0Y 0+ 0Y 0 .00 |
| .250 .250 | EST. | Y 6 // .150 .00 (2) | Y 0 // 0.000 00.00 | Y 6 // .150 ----- (2) | Y 0 // 0.000 00.00 | Y 8 // .200 1.20 (2) |

a) Exemplo de relatório de cálculo para uma viga (Nuno Gomes, 2011, e Raúl Sousa, 2015)

| QUADRO DE MEDICAO DE BETAO E ACO EM VIGAS | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------------|------|-------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|
| Piso | Betao (m3) | Cofr. (m2) | Varoes Longitud. | | | | | | Estribos | | |
| | | | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 6 | 8 | 10 |
| 1 | 2.2 | 19.5 | 0.0 | 36.8 | 124.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 29.5 | 7.2 | 0.0 |
| 2 | 2.2 | 19.5 | 0.0 | 36.9 | 123.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 35.9 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 2.2 | 19.5 | 0.0 | 36.6 | 125.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 29.5 | 7.2 | 0.0 |
| Total | 7. | 58. | 0. | 110. | 374. | 0. | 0. | 0. | 95. | 14. | 0. |
| | | | Total de Varoes Longitudinais= 484. | | | | | | Total Estr.= 109. | | |

b) Exemplo de quadro de medição de betão e aço numa viga (Raúl Sousa, 2015)

Figura 3.38 – Exemplo de relatórios e quadros informativos em PAC

Pode-se observar na figura 3.38 a) que no relatório de cálculo as informações fornecidas vão desde as áreas necessárias de aço para resistir aos esforços, à discriminação por zonas de relevância construtiva do número de varões e respetivo diâmetro, numa viga. Comparando as soluções atribuídas em PAC com as que já haviam sido dimensionadas em Robot chegamos à conclusão que existem ligeiras diferenças. A primeira diferença está no diâmetro dos varões da armadura longitudinal superior, apesar de ser o mesmo número de varões que em Robot o diâmetro escolhido pelo algoritmo do PAC é de 10 mm enquanto o programa Robot optou um diâmetro de 12 mm, esta diferença pode ser devida ao PAC-Pórticos permitir que o projetista controle uma redistribuição de momentos negativos, quando os programas mais modernos, por vezes, tornam-se menos disponíveis para essas opções de controlo da análise estrutural pelos utilizadores.

Um problema que pode surgir no dimensionamento, este no dimensionamento de pilares, é que acaso o utilizador opte por simular uma parede, a solução atribuída, naturalmente não se adequa a paredes. De qualquer modo, o PAC, antecipando essa possibilidade, permite simulações de paredes e para efeitos de desenho até se preocupa com o limite de dimensão para pilares, que em caso de se ultrapassar, pergunta qual a dimensão da outra face do pilar assumindo o limite de 1,20 metros na face de maior dimensão.

2ª fila de pilares tem uma secção de grandes dimensões.

De modo a tornar o desenho mais proporcionado,

vou diminuir a largura para 1.2 m \Rightarrow espessura (m) = ?

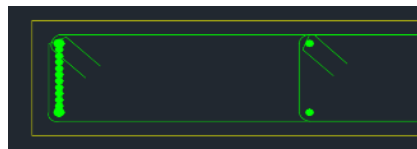


Figura 3.39 – Exemplo de solução adaptada em pilares (Simulação de parede)

A grande vantagem do PAC em relação aos programas de cálculo mais recentes é a sua capacidade de criar todos os elementos CAD necessários numa questão de segundos e com um detalhe superior aos desenhos criados por programas atuais.

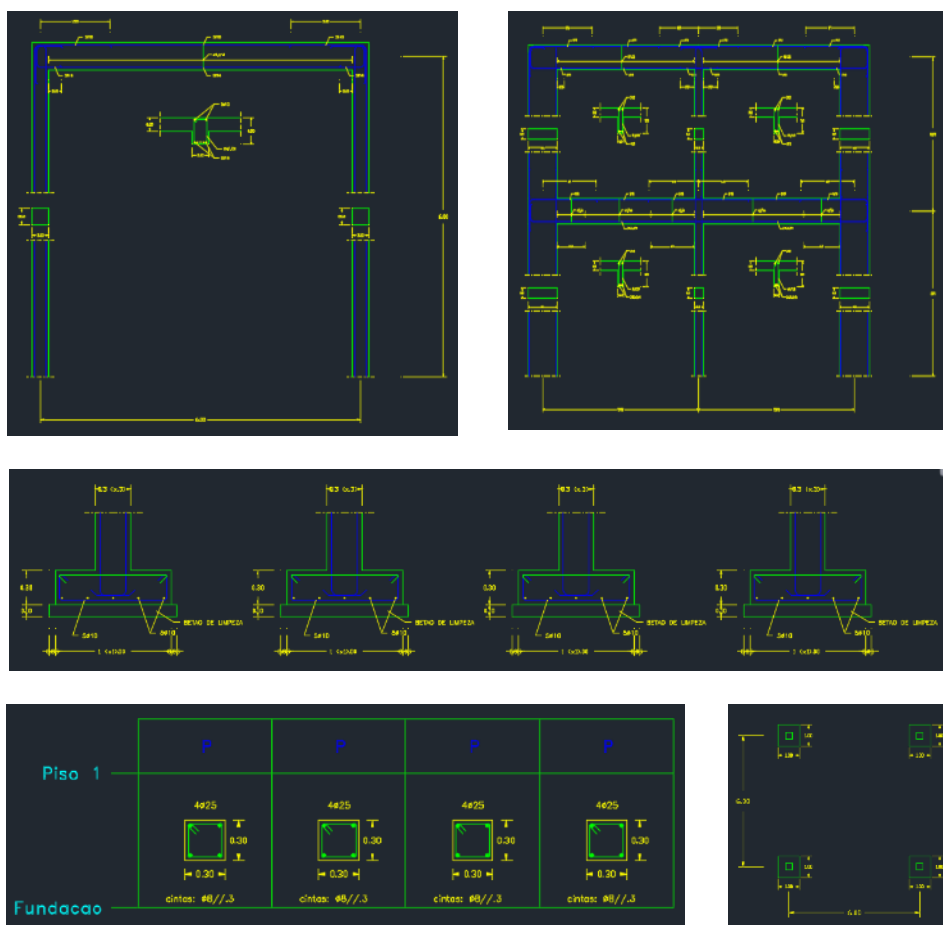


Figura 3.40 – Exemplo de desenhos automáticos criados pelo PAC

Após a conclusão de todo o processo de modelação, análise e dimensionamento o PAC tem a capacidade de criar ficheiros .DXF com toda a informação e representação CAD de todos os pormenores do dimensionamento incluindo comprimentos, amarrações, dispensas e as anotações de dimensão de secção e perfil longitudinal. O PAC apresenta toda essa informação devidamente agrupada, cada pórtico criado tem um ficheiro CAD associado, quadro de sapatas, representação em planta das fundações e quadro de pilares. Na dissertação do Raúl Sousa (2015), foi criada uma extensão para o PAC capaz de representar, em ficheiro CAD, vigas com armaduras em formato tridimensional, semelhante ao que é criado no *software* Advance Concrete.

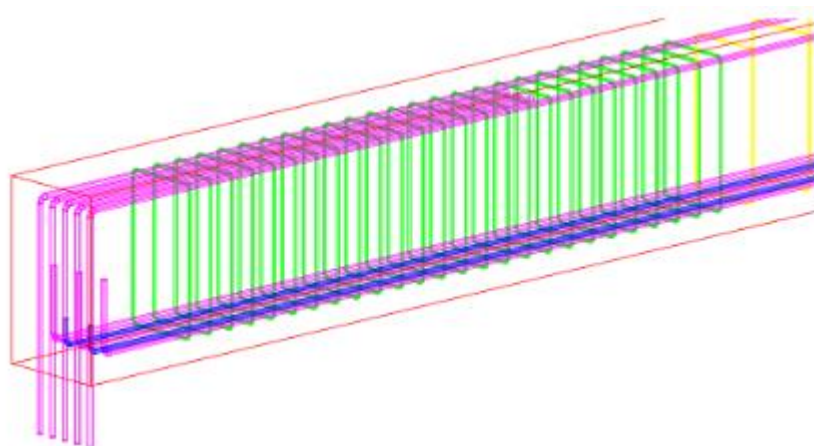


Figura 3.41 – Pormenor de viga em 3D criada a partir de dados PAC (Raul Sousa, 2015)

Concluindo, o PAC é um *software* que proporciona ao seu utilizador um conjunto de ferramentas para projetos de estruturas que embora desatualizadas em comparação com os programas de cálculo mais atuais são capazes de modelar e apresentar soluções de uma forma rápida e correta. As suas limitações, seja em parâmetros de cálculo ou opções de personalização, acabam por demonstrar que existe uma evolução do *software* nesta área em específica.

Tendo hoje o utilizador mais poder de decisão e uma análise mais cuidada de um projeto de estruturas. Os parâmetros mais avançados, os avisos e limitações em função dos regulamentos aplicáveis são uma evolução agradável e que facilitam e agilizam o processo de dimensionamento estrutural, a própria modelação e personalização de armaduras num ambiente tridimensional, ainda que peça a peça no caso do Robot, permitem ter uma maior sensibilidade do que é a solução aplicada. Mas nem tudo é perfeito, já foi visto que em Robot também existem alguns problemas e os desenhos de pormenor criados podiam ter a opção de exportação para um formato CAD.

Se fosse possível acrescentar o módulo de criação de desenhos do PAC e corrigir alguns dos problemas do Robot teríamos um *software* ideal e BIM, algo que o PAC em 1991, ainda que fora do contexto atual de BIM, já se podia dizer que o era.

3.3 MODELAÇÃO

Neste ponto são abordadas as principais funcionalidades de modelação de armaduras, as suas capacidades de atribuir detalhe, os documentos e desenhos produzidos. Também é estudada a interoperabilidade de cada um dos programas.

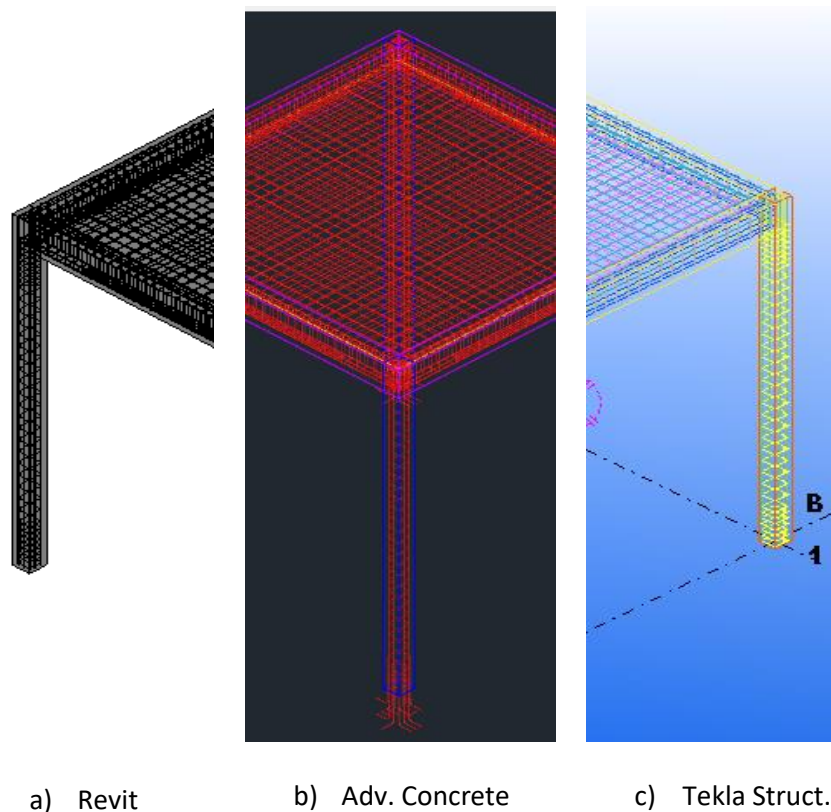


Figura 3.42 – Caso de estudo 1 modelado em diferentes programas

O caso de estudo 1 é novamente a principal estrutura de estudo na avaliação dos programas em estudo: o Revit 2017, o Advance Concrete 2017 e o Tekla Structures Learning 2016.

Devido a determinadas funcionalidades dos programas mencionados, existiu uma necessidade de recorrer, inicialmente, a versões anteriores às mais recentes, nomeadamente o Revit 2016. Todas as versões dos programas analisados, incluindo o *software* Robot Structural Analysis 2017, foram obtidas a partir de uma licença de estudante.

Por se tratarem de licenças de estudante algumas das funcionalidades não estão disponíveis para uso, mas é possível obter a maior parte das funcionalidades para teste. As que ficam por utilizar são para usos mais avançados do programa e não afetam a capacidade de modelação mais comum, seja da parte arquitetónica ou de pormenorização.

O segundo caso de estudo é apresentado em anexo com a aplicação feita do *software* que se revelou mais vantajoso.

3.3.1 REVIT 2016/2017

Tal como nos programas de análise e dimensionamento, é feita uma breve introdução aos principais conceitos de modelação deste *software* e são dados alguns conselhos e cuidados a ter na correta modelação. Não só dos elementos de armadura, mas também dos elementos que irão receber essas armaduras (vigas, pilares, lajes).

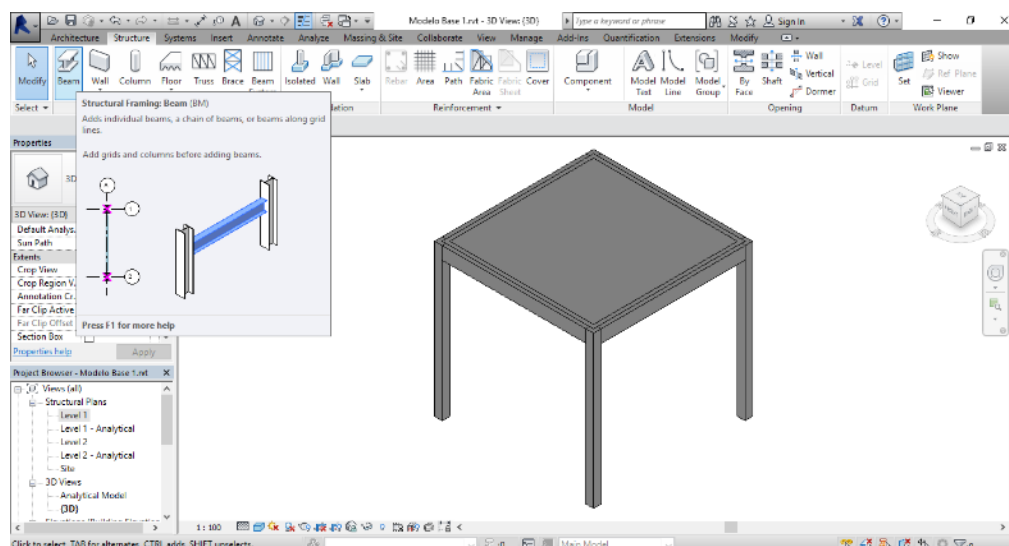
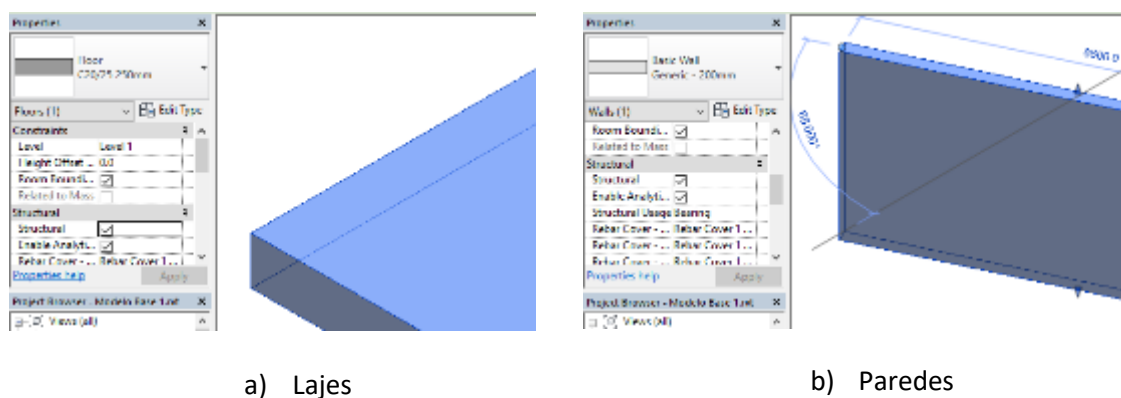


Figura 3.43 – *Layout* de interface de modelação de elementos estruturais em Revit

Desde logo existem diferenças na criação de elementos segundo os padrões de arquitetura ou da engenharia de estruturas. A grande diferença é a criação de um modelo analítico que pode ser transportado para Robot e posteriormente analisado. Existem outras diferenças como a possibilidade de atribuir armaduras. Apesar de ser possível garantir que os parâmetros materiais e visuais são idênticos, o programa não reconhece os elementos arquitetónicos do tipo viga e pilar como elementos estruturais já que estes não possuem parâmetros para definição de recobrimento, nem reconhece os parâmetros físicos dos materiais atribuídos. Em lajes e paredes o programa já não é tão restritivo e permite, através da edição do objeto na janela de propriedades, definir esses elementos como estruturais.



a) Lajes

b) Paredes

Figura 3.44 – Definição de Lajes e Paredes como elementos estruturais

Para que a passagem do modelo Revit para Robot seja feita da forma mais correta é necessário ter atenção a um conjunto de pormenores de modelação, mas antes é necessário abordar o tema das bibliotecas de materiais e de componentes do Revit, uma vez que sem estas bibliotecas não é possível criar/modelar os elementos necessários, sejam eles estruturais ou de qualquer outro tipo.

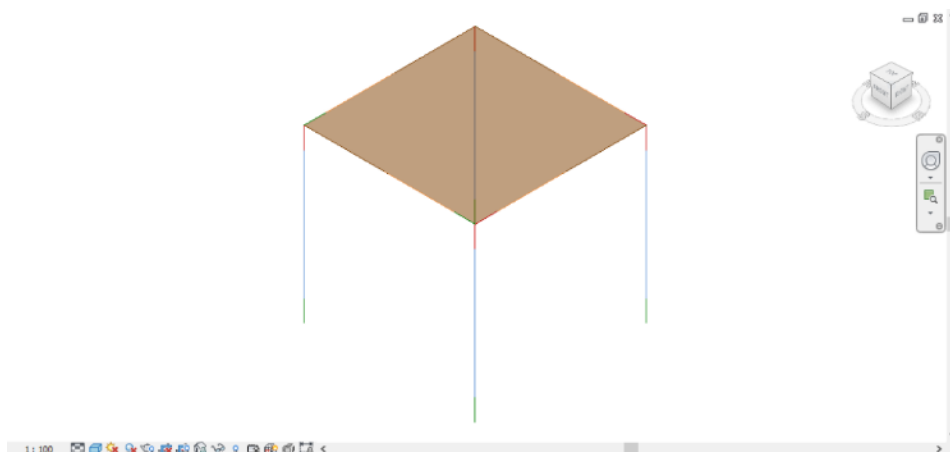
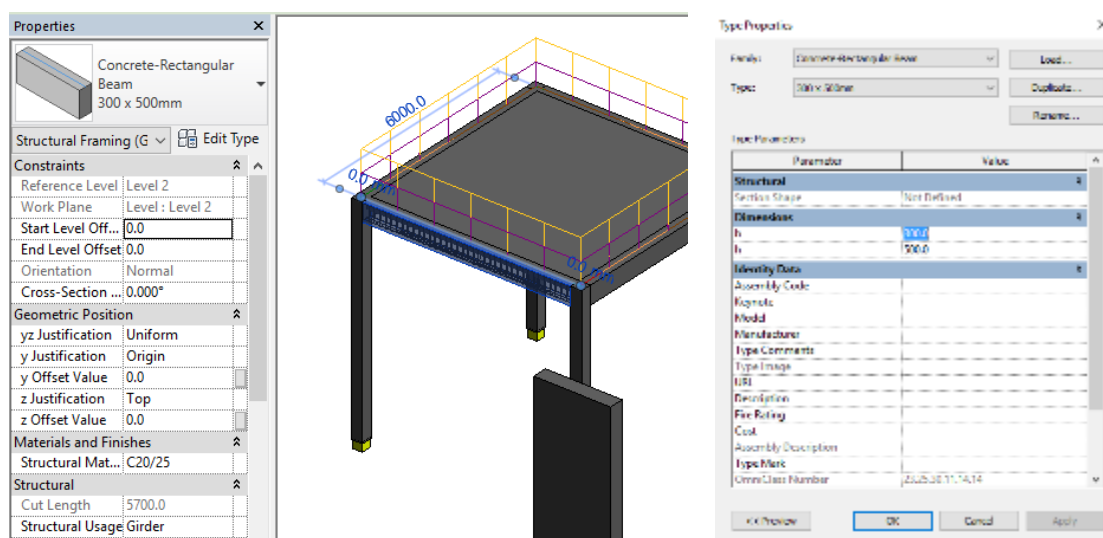


Figura 3.45 – Exemplo de modelo analítico criado em Revit

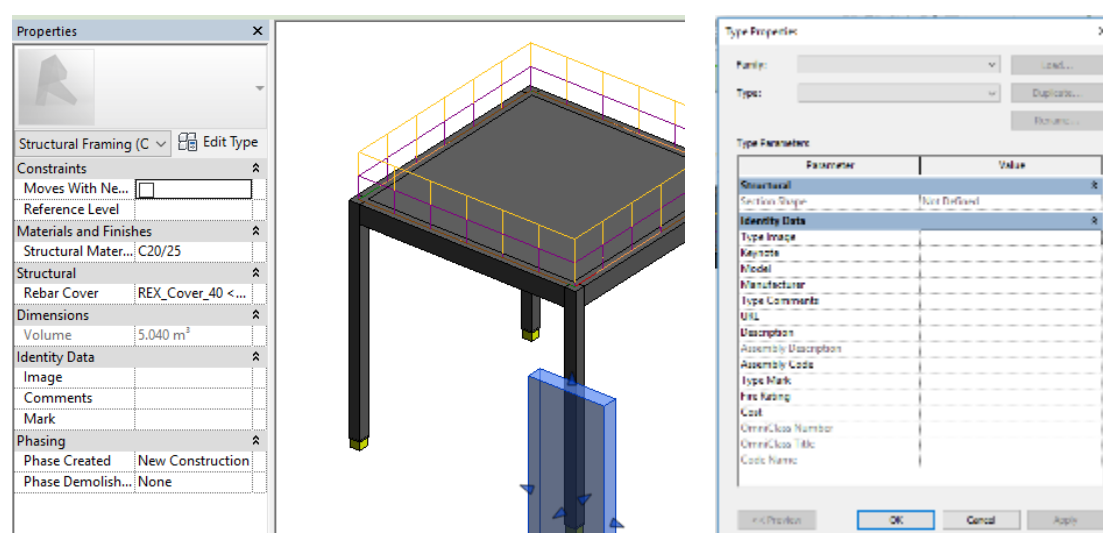
Aquando a instalação o programa permite a instalação de bibliotecas, sendo que algumas já se encontram seleccionadas por defeito, mas é possível seleccionar as bibliotecas correspondentes a Portugal e a qualquer outro local que seja do interesse do utilizador. O facto de optarmos por bibliotecas extra pode permitir o acesso a componentes e materiais que não existem no pacote básico, o que é uma vantagem em termos de modelação, já que permite dispensar a parte de criação manual de componentes necessários no projeto. A criação manual é uma das grandes vantagens deste programa já que permite modelar qualquer tipo de secção estrutural, ou, fugindo ao tema de modelação estrutural, até equipamentos mecânicos e peças de mobiliário não existentes nas famílias instaladas. O programa tem várias opções de modelação de componentes e dois módulos para criação; o *Model In-place* e a criação de uma família ou massa conceptual, o primeiro permitindo a criação de uma instância no ficheiro de trabalho enquanto o segundo cria um componente que pode ser carregado para qualquer projeto. O uso da primeira opção tem a vantagem de ser de aplicação rápida, mas deve ser utilizado para pormenores de detalhe ou para componentes isolados. A segunda hipótese permite, através da definição de *labels* – parâmetros geométricos editáveis fora do modo de criação de componentes – criar elementos adaptáveis às necessidades do projeto introduzindo dados geométricos da secção nos espaços definidos pelos *labels* estabelecidos.

Ambos os módulos têm a capacidade de atribuir o componente a uma categoria de família, mas a criação segundo o *Model In-place* implica a criação manual do modelo analítico a qual pode não ser fácil de

executar, uma vez que não existe muito material exemplificativo sobre este método de criação de linhas analíticas.



a) Viga criada a partir de uma família Revit de *Structural Framing*



b) Elemento *Model In-place* atribuído à categoria *Structural Framing*

Figura 3.46 – Comparação entre dois elementos modelados em Revit

Na figura 3.46 é possível perceber a diferença na quantidade de propriedades de um elemento modelado diretamente no projeto e um modelo carregado a partir de uma família. Nos *Type Properties* existem ainda os parâmetros *Dimensions* que contêm os *labels* com dimensões geométricas editáveis.

Outra forma de obter elementos sem que seja necessário proceder à criação de famílias por parte do utilizador é aceder a portais *online* que disponibilizam famílias e componentes desenvolvidos por outros entusiastas de modelação em Revit, como o *RevitCity.com*. Algumas empresas hoje em dia já possuem modelos dos seus equipamentos em catálogos *online* e disponíveis *online*.

As bibliotecas de materiais são mais simples de empregar e permitem utilizar, criar ou carregar materiais de qualquer tipo e atribuir todas as características físicas e visuais necessárias.

Em vigas e pilares estruturais, a definição do material estrutural é diferente da definição em lajes como ficou atrás referido; em lajes o programa tem a capacidade de assumir várias camadas materiais, em elementos do tipo “barra” o programa assume um único material. Por essa razão uma laje pode ser modelada como elemento de arquitetura e mais tarde ser definida como estrutural.

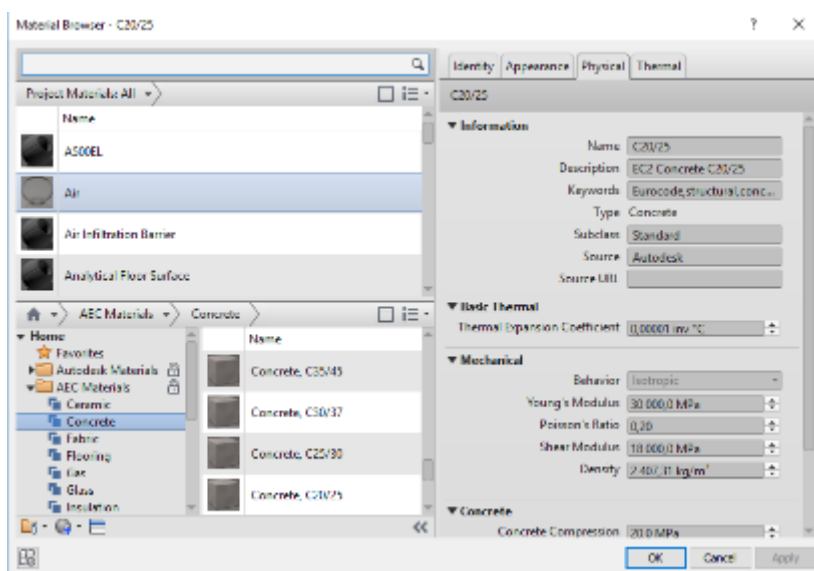


Figura 3.47 – Navegador de materiais em Revit

Em lajes e paredes o método de edição permite definir uma camada como sendo estrutural e criar as demais camadas como elementos de enchimento e arquitetura. Na transição entre Revit e Robot este último vai assumir o material estrutural e ignorar os restantes constituintes da laje.

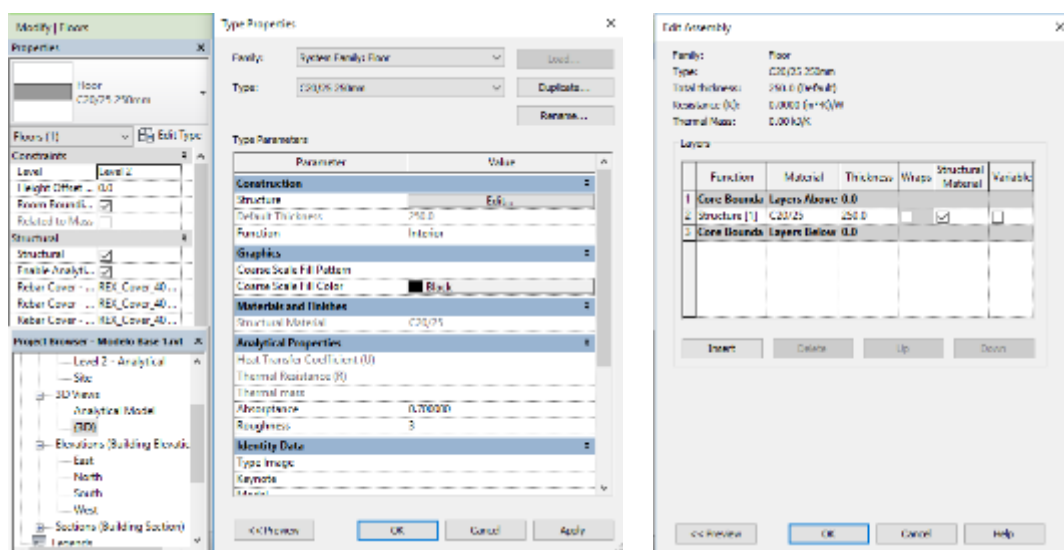


Figura 3.48 – Exemplo de definição de camadas materiais em lajes

Relativamente ao processo de modelação, se for somente um modelo de arquitetura os cuidados descritos seguidamente não são necessários, mas se o caso for de modelação de um esqueleto estrutural para eventual análise e/ou preservação de informação do projeto num modelo, então, é conveniente ter atenção a alguns pormenores.

Na ligação entre vigas e pilares desde que esta seja feita intersetando os eixos dos elementos o programa irá criar uma boa ligação analítica, o modelo tridimensional é que pode precisar de ajustes, principalmente se a ligação não for ortogonal ou se a geometria da secção for mais complexa.

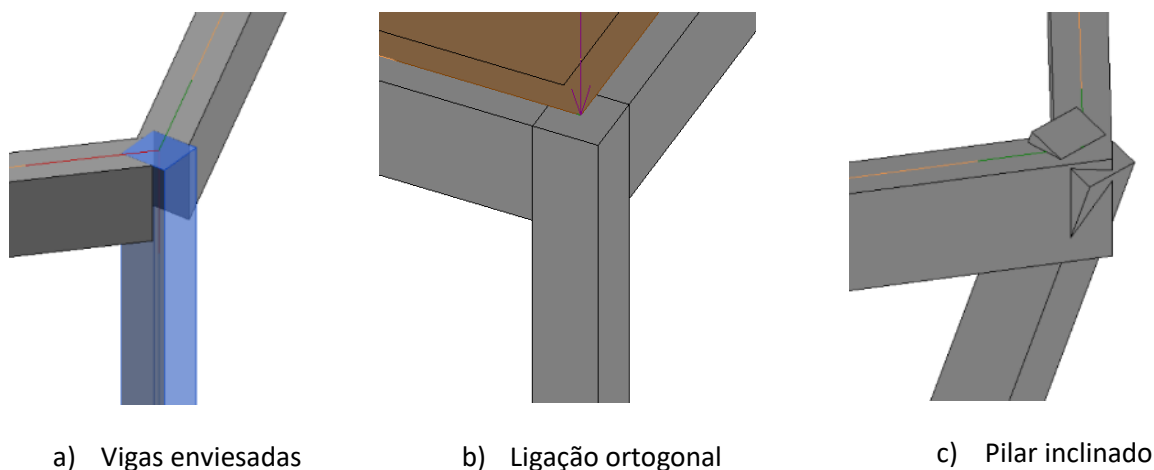


Figura 3.49 – Exemplos de Ligação entre vigas e pilares

Em lajes o utilizador pode-se sentir tentado a criar o objeto seguindo o contorno das faces exteriores das vigas ou de pilares, o que pode gerar desfasamentos entre elementos analíticos. Habitualmente isto acontece quando as dimensões dos pilares ou de uma viga possuem um valor considerável, afastando o limite da laje das vigas analíticas.

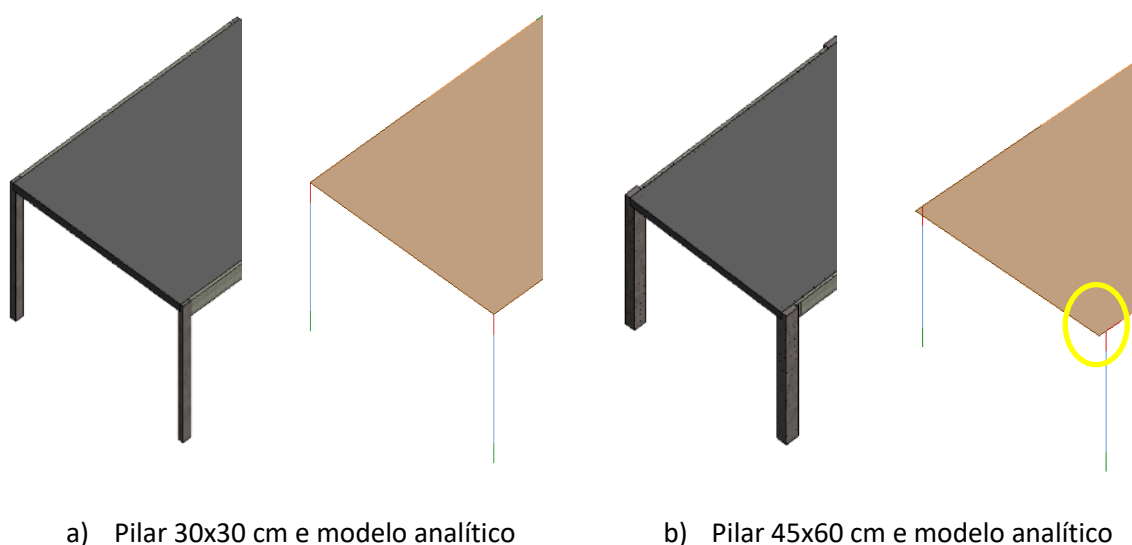


Figura 3.50 – Exemplo de criação de estruturas e do seu modelo analítico

É possível ver no exemplo b) da figura 3.50 o que foi referido no parágrafo anterior. É possível corrigir estes desencontros através da edição do modelo analítico.

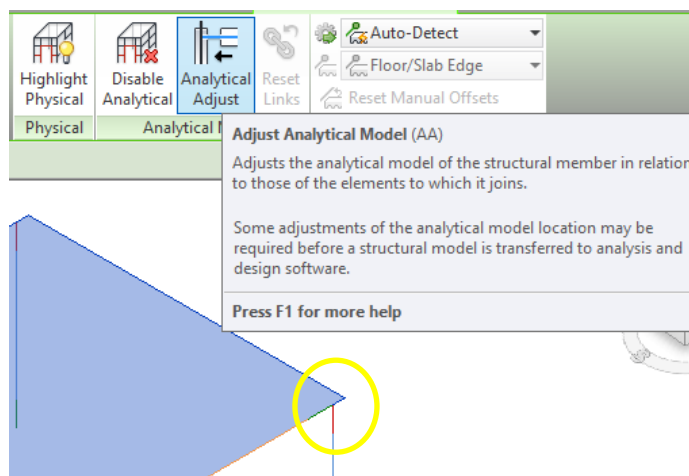


Figura 3.51 – Menu para ajuste de elementos analíticos

A ligação entre o Revit e o programa Robot já está na generalidade muito bem conseguida embora ainda existam algumas falhas de comunicação, mas a grande maioria das vezes estas ocorrem no sentido Robot-Revit. Esta aposta de interoperabilidade entre os dois *softwares* é uma das apostas da Autodesk na tentativa de facilitar o trabalho aos projetistas. A permissão do *software* na criação de cargas e combinações semelhantes aos que o programa de análise e dimensionamento permitem, assim como a definição dos apoios e a opção de integração direta com o programa são algumas das opções presentes em Revit. Apesar destas opções serem boas adições ao *software*, a necessidade de realizar constantes ajustes ao modelo analítico e as opções de colocação de cargas menos desenvolvidas em comparação com o Robot, acabam por complicar a idealização de um modelo para análise estrutural e afastam os utilizadores destas funcionalidades, preferindo os mesmos criar um modelo original em Robot. Por exemplo, a criação de um painel inclinado em Revit obriga a definir a inclinação do modelo tridimensional e de seguida obriga à atribuição de uma inclinação do modelo analítico. Entre outros problemas, a maioria relacionado com as uniões parede-parede e/ou parede-laje, ou seja, tudo o que em Robot acabe por ser definido como elemento casca ou painel estrutural. Existem ainda desconexões entre elementos barra e lajes caso a ligação seja conseguida com base num apoio suspenso, algo que é resolvido se definirmos a laje como não estrutural.

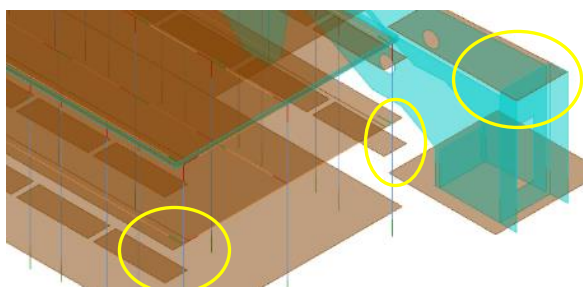
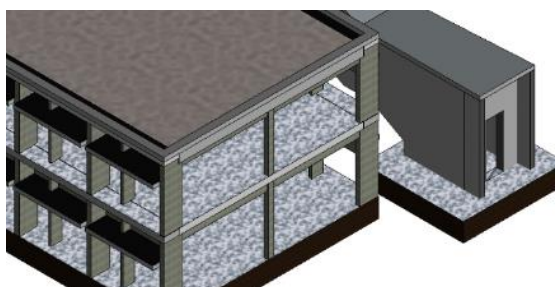


Figura 3.52 – Exemplo de falhas de união entre elementos analíticos em Revit

A opção de criar o modelo a partir do programa de análise e integrá-lo em Revit também não é a opção mais viável, visto que as bibliotecas em Robot não são iguais às do programa de modelação e a representação do modelo acaba por apresentar texturas estranhas ao material e a informação contida nos elementos acaba por ser inteiramente relacionada com as propriedades resistentes desprezando algumas características físicas que podem ser relevantes para projetos térmicos ou de outra especialidade.

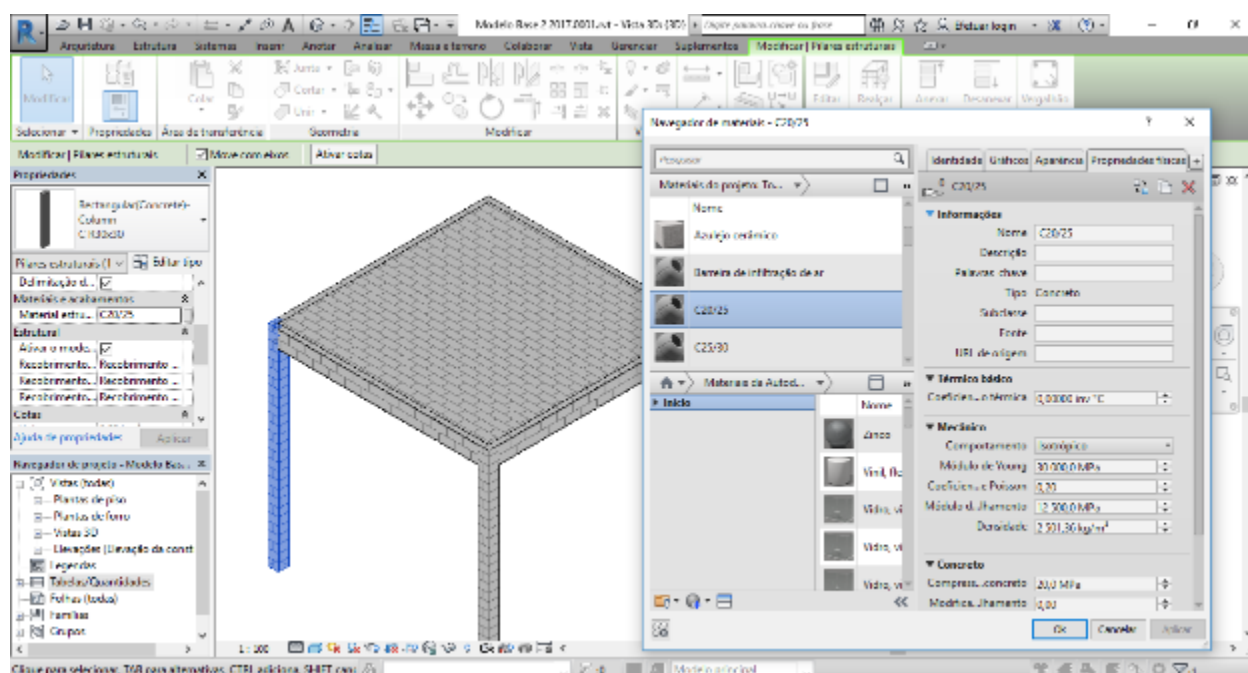


Figura 3.53 – Exemplo de integração Robot-Revit

É possível ver pela figura 3.53 que existe um défice de informação apresentada no quadro de informações sobre o material estrutural e que a textura de apresentação da estrutura mais se assemelha a blocos de betão do que a um elemento homogéneo de betão armado.

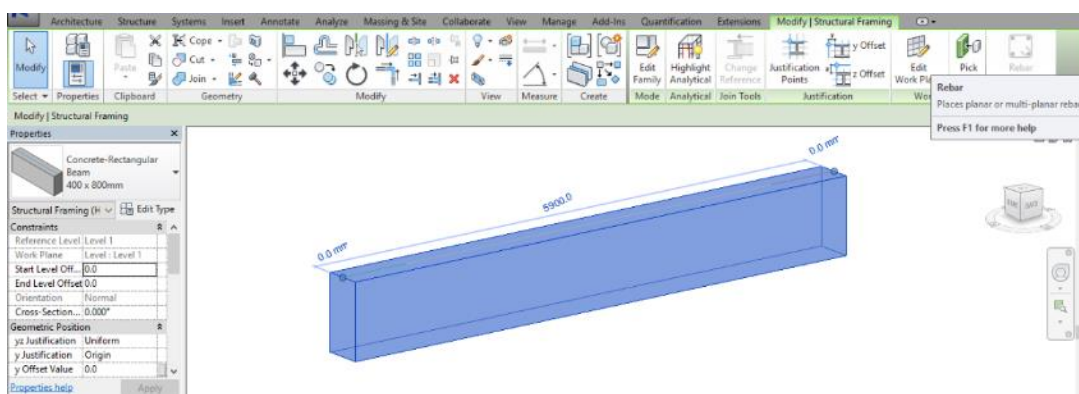
Concluindo sobre a modelação estrutural, o Revit apresenta bastantes opções de modelação válidas, rápidas de assimilar e, com o devido cuidado, aptas para um cálculo estrutural integrado com o *software* Robot. Mas ainda existe espaço para aperfeiçoar esta ligação e para melhorar alguns aspetos de modelação mais básica. A necessidade de corrigir dois modelos, o analítico e o de representação geométrica, no interior de um só programa acaba por desencorajar a criação de um único modelo para análise e dimensionamento prejudicando o ideal de interoperabilidade ambicionado pela metodologia BIM.

Após a criação dos elementos estruturais desejados, da definição dos materiais e dos ajustes das peças no modelo é possível definir o valor do recobrimento nominal pretendido utilizando a opção *Cover* e acedendo ao *Rebar Cover Settings*. Após a definição do valor de recobrimento basta clicar nos elementos onde queremos atribuir esse valor, incluído lajes e paredes. Se um dado valor de recobrimento for

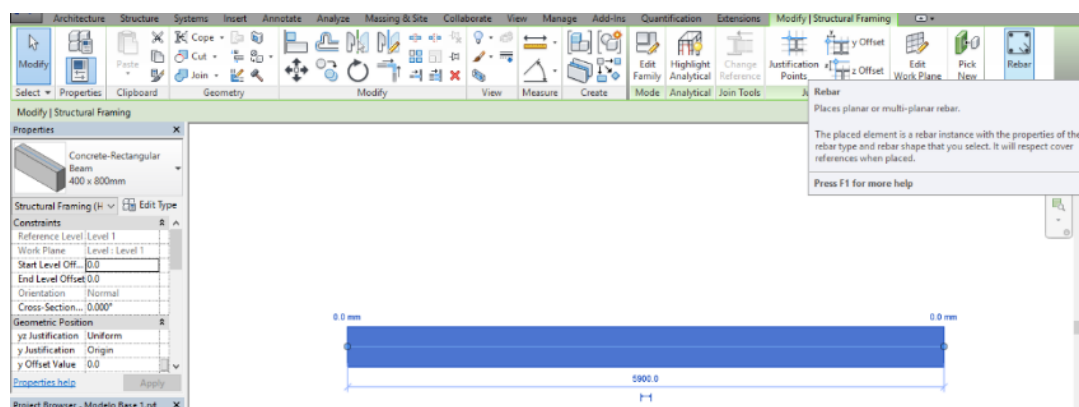
aplicado a um conjunto de faces em vez de ser aplicado no perímetro de todo o elemento o programa também o permite, bastando escolher a opção *Pick Faces* em detrimento da *Pick Elements*.

Em Revit existe a possibilidade de aplicar armaduras em elementos de forma manual ou através de extensões. A possibilidade de instalar a extensão pode estar dependente da versão utilizada do programa, mas a primeira opção de modelação encontra-se sempre disponível nas últimas versões do *software* para qualquer tipo de utilizador.

A primeira obrigação que o processo de modelação manual impõe é a necessidade de criar uma vista bidimensional ou recorrer à vista em planta para ser possível aceder ao menu de criação. É possível ver na figura 3.54 que no modo de visualização 3D, mesmo após a seleção do elemento, a opção *Rebar* se encontra desativada. Ao efetuar a mudança para uma vista em planta e resseleccionando a viga em estudo a opção passa a ficar disponível, mas a aplicação em si só é possível após a definição de um plano de corte longitudinal, a não ser que se use a opção *Area* ou *Path* em lajes e paredes, que podem ser diretamente aplicadas no ambiente tridimensional.



a) Vista 3D



b) Vista em Planta

Figura 3.54 – Possibilidade de introdução manual de armadura numa viga

Ao seleccionar a ferramenta *Rebar* surgem novos menus de edição de varões; nestes menus existem comandos para definição do plano de introdução dos varões e qual o plano de dobragem dos mesmos.

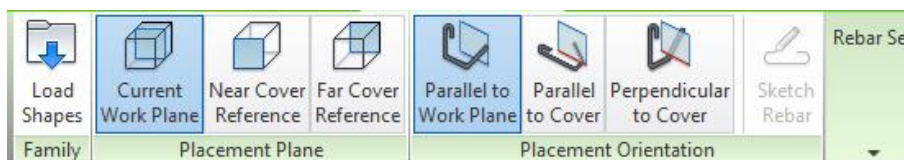
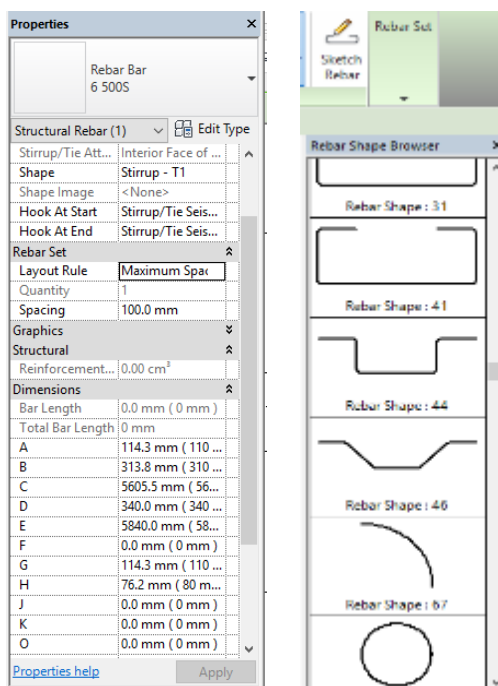


Figura 3.55 – Definição de planos de trabalho na criação de varões e cintas de aço

Além da definição de planos é também permitido definir a forma do varão e alterar na janela de propriedades as dimensões de qualquer elemento colocado no objeto a reforçar.



a) Propriedades b) Formas

Figura 3.56 – Opções para definição de uma barra

É aconselhável dar início à modelação de armaduras a partir dos elementos transversais, porque ao definirmos primeiro estas armaduras todos os elementos longitudinais criados de seguida vão-se adaptar às cintas/estribos previamente instaladas na peça e distribuir-se de forma simétrica pelo espaço em sobra.

A biblioteca de formas pode ser aumentada e é possível definir formas novas para criar formatos personalizados de varões longitudinais ou cintas/estribos. Para perceber melhor as dimensões apresentadas na barra de propriedades é aconselhável a consulta da página de ajuda do Revit que possui informações sobre a lógica das restrições geométricas aplicáveis. Como cada forma possui o seu conjunto específico de restrições não é possível neste texto efetuar uma descrição exaustiva.

A opção para colocação de barras, após a definição dos planos de trabalho, passa por declarar ao programa se se pretende instalar um único varão ou um conjunto, quais os diâmetros e o tipo de aço, os ângulos de dobragem dos ganchos nas extremidades e ainda se se pretende definir o espaçamento entre varões segundo um espaçamento máximo, mínimo, quantidade de varões ou quantidade e espaçamento

fixo entre elementos. Estas opções podem entrar em conflito quando é necessário colocar diferentes conjuntos de varões na mesma linha de Armadura.

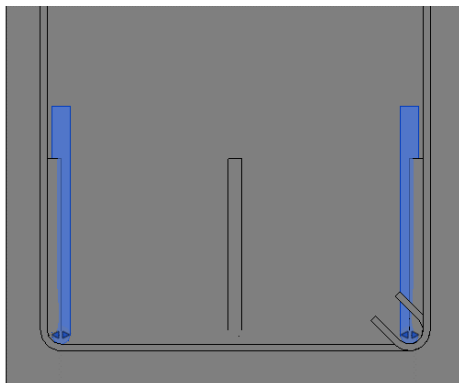


Figura 3.57 – Exemplo de sobreposição de varões longitudinais em vigas (corte transversal da peça)

Em lajes o processo é mais simples com as ferramentas *Area* e *Path* que podem ser diretamente aplicadas na representação 3D, tanto que a extensão não possui ferramentas para definição de armadura em lajes. A primeira ferramenta permite, tal como o nome indica, definir uma área de armadura numa superfície, seja uma parede ou uma laje. Esta permite definir a malha longitudinal, qual a direção principal (a armadura que se encontra próxima à face do elemento), assim como o diâmetro dos varões e o espaçamento entre os mesmos, nas duas direções ortogonais e nas duas faces do objeto.

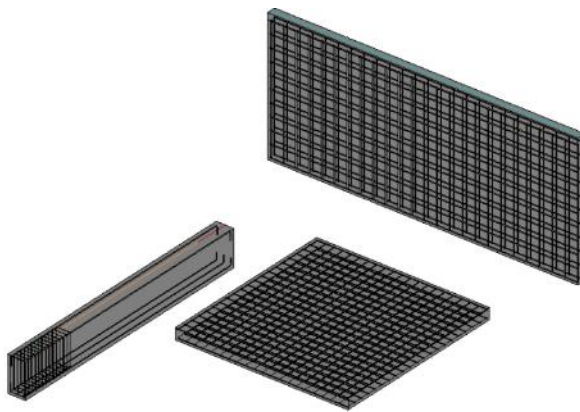
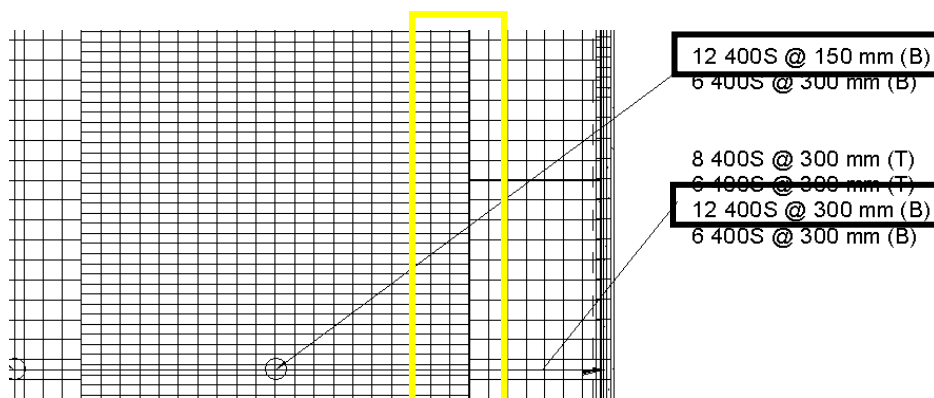


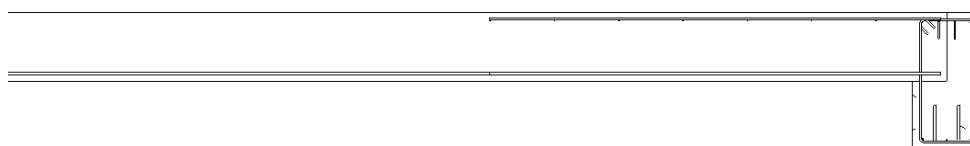
Figura 3.58 – Exemplo de objetos com armaduras em Revit

É uma opção que facilita imenso a acomodação das armaduras ao colocar automaticamente todo o conjunto de varões, adaptados ao espaço disponível e à restrição de espaçamento ou do número de varões definido pelo utilizador, mas que por adaptar o número de varões ao espaço, acaba por falhar em alguns pontos. Se for necessário modelar uma dispensa na laje, assumindo como exemplo uma laje armada numa só direção, o programa vai distribuir a malha da zona mais condicionante por um dado espaçamento e na zona de dispensa, em teoria, o espaçamento entre varões passaria para o dobro, mas o programa assume outro espaçamento criando um erro na ligação entre as duas zonas de armaduras

devido aos ajustes automáticos sobre o espaço disponível. Além de existir uma separação entre os varões da zona de dispensa e da zona condicionante.



a) Vista em planta



b) Corte transversal (Perfil longitudinal da direção principal de armadura)

Figura 3.59 – Exemplo de armadura com dispensa numa laje armada numa só direção

Na figura 3.59 pode observar-se um exemplo do problema referido no parágrafo anterior. Olhando primeiro para a legenda da vista em planta para os elementos marcados com (B), de *Bottom Reinforcement*, vemos que apesar de na zona de maior esforço termos uma marcação de $\phi 12//0,15$ e na zona de dispensa a marcação apontar para $\phi 12//0,30$, não existe uma compatibilidade entre as duas zonas distintas.

A ferramenta *Path* é uma ferramenta complementar da anterior, também aplicável a lajes e paredes e permite adicionar elementos, por exemplo, para pormenor de amarração entre lajes/paredes ou cantos de paredes. O uso também pode ser proveitoso em conjunto como com a ferramenta *Area*, ao utilizar a modelação de armaduras por área para a definição dos elementos com o espaçamento referente à zona de maior afastamento e aplicando os elementos necessários para complementar a zona de maior esforço da laje com a ferramenta *Path*, desaparecendo os erros associados à divisão de varões e ao desfasamento mencionado na figura 3.59.

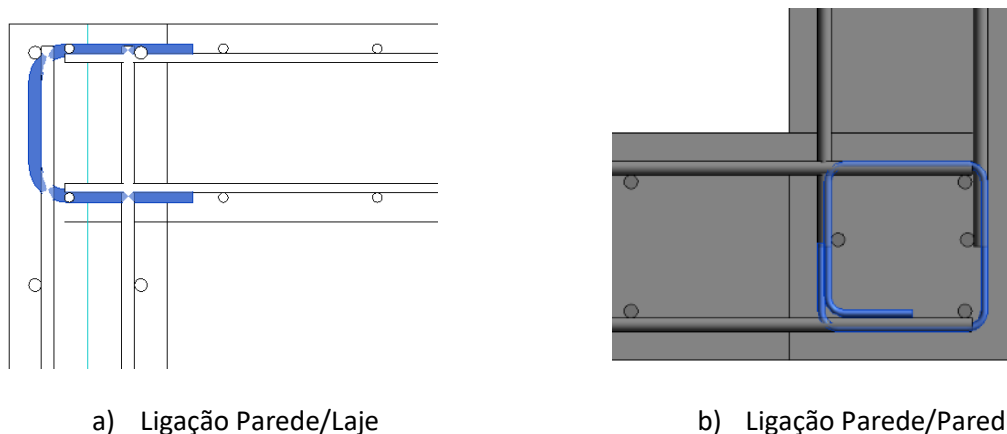


Figura 3.60 – Exemplo de pormenor de ligação

No que se refere à extensão para modelação de armaduras, esta ferramenta permite a introdução de armaduras em vigas, pilares e outros elementos relevantes como sapatas ou muros de suporte, mas não é aplicável a qualquer tipo de secção ou elemento. Por exemplo, em vigas e pilares esta opção só é aplicável em elementos com secção retangular, ou pilares de secção circular.

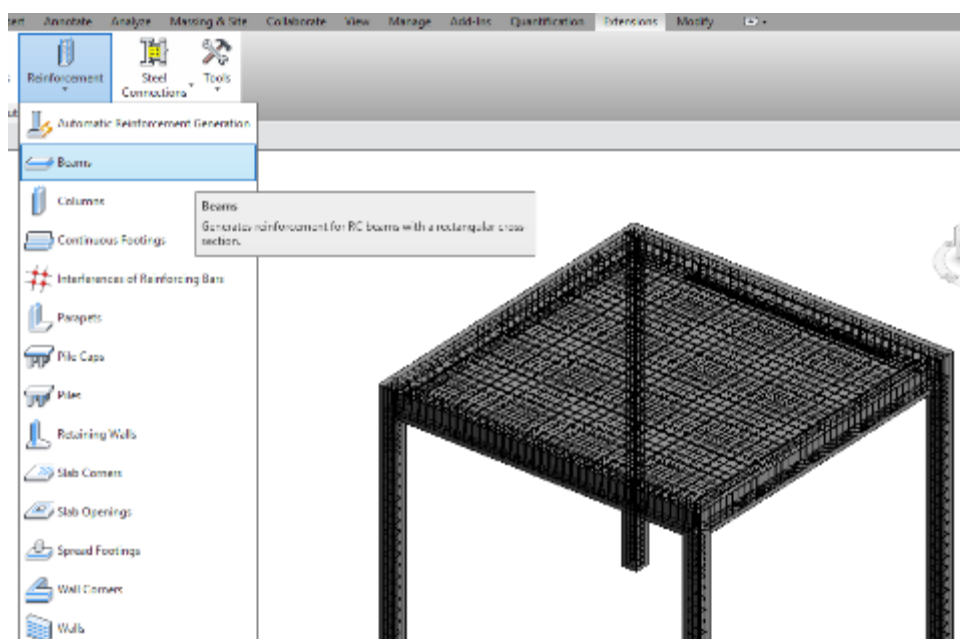


Figura 3.61 – Extensão para Armadura de elementos estruturais em Revit

Apesar destas limitações a extensão é bastante mais simples de usar que o processo manual e possui uma funcionalidade interessante que é o *Dynamic Model Update*, que adapta as soluções aplicadas a qualquer modificação geométrica feita nos elementos, como o comprimento ou a posição. No processo manual isto não ocorre, ficando a armadura no mesmo local e com a mesma configuração com que foi criada.

Já foi referido no ponto sobre modelação em Robot que a opção *Typical Reinforcement* é idêntica a um *add-in* para Revit, com mais ou menos limitações, que podem ser mitigadas caso seja utilizada em conjunto com o método manual de modelação. É claro que recorrer a uma modelação combinada vai

aumentar o tempo necessário para modelar um elemento, mas esta possibilidade só demonstra a versatilidade do *software*.

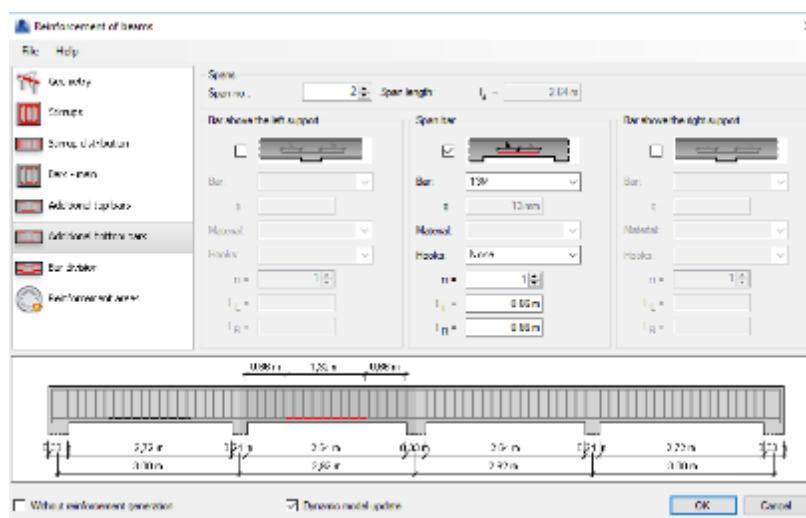


Figura 3.62 – Interface para definição de armaduras em vigas com a extensão para Revit

As opções da extensão vão desde a definição de uma armadura base, à adição de elementos adicionais de armadura em três secções distintas de cada vão, reconhecendo os diversos vãos da viga e sendo ainda capaz de assumir a divisão dos varões em função de um comprimento máximo ou dividindo automaticamente em cada apoio intermédio. Em pilares as ferramentas são semelhantes, mas adaptadas ao tipo de elemento. A extensão reconhece os diversos vãos, mas ao contrário das vigas este não permite alterar as soluções entre vãos e admite que as cintas terminem na primeira viga ou laje que surja no modelo. Em vigas também podem surgir problemas com a sobreposição das armaduras longitudinais, superiores e inferiores, nas zonas de amarração e nos nós, obrigando a determinados ajustes. Ainda assim é uma ferramenta muito útil se bem utilizada.

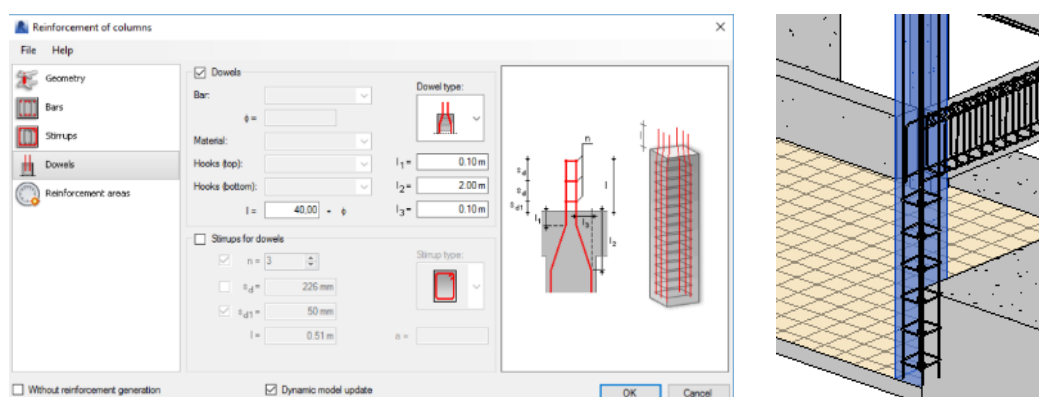


Figura 3.63 – Interface e exemplo de modelação em pilares com a extensão em Revit

Voltando à temática da interoperabilidade Revit-Robot e vice-versa é, em teoria, é possível enviar o modelo Revit para Robot com as armaduras e fazer uma verificação de segurança. A passagem dos elementos geométricos, vulgo barras e painéis, é conseguida com maior sucesso do Revit para o Robot,

mas os elementos de armadura não foram reconhecidos pelo último. A tentativa de verificar para um elemento a solo também se mostrou infrutífera, uma vez que a passagem de cargas é efetuada mas os cálculos tem de ser iniciados manualmente em Robot e se não existir nenhuma carga aplicada diretamente no elemento ele não reconhece a distribuição de cargas provenientes do funcionamento global da estrutura. A passagem do modelo até pode aparentar ter conseguido a passagem dos elementos de armadura de um dos objetos, mas ao selecionar os mesmos apercebemo-nos da inexistência desses elementos.

As armaduras modeladas em Robot e a sua passagem direta para Revit já é uma perspectiva mais realista, mas ainda longe da perfeição. O primeiro problema ocorre logo na passagem do modelo, já que se este for volumoso em termos de informação e elementos reforçados, o *hardware* pode demorar demasiado tempo a processar toda a informação; por outro lado a passagem de armaduras em lajes não é feita e a passagem da geometria das lajes também pode estar exposta a erros, com painéis a serem ignorados ou a serem colocados de forma não correspondente ao modelado em Robot. Este problema deve-se ao Revit que não consegue compatibilizar a geometria de painéis inclinados se estes estiverem identificados como paredes, problema que não acontece com tanta frequência em lajes. Em elementos de barra os erros já não são frequentes, mas também podem estar sujeitos a alterações na passagem, principalmente se forem elementos metálicos ou se o modelo de cálculo não tiver em conta possíveis *offsets* relevantes para a arquitetura.

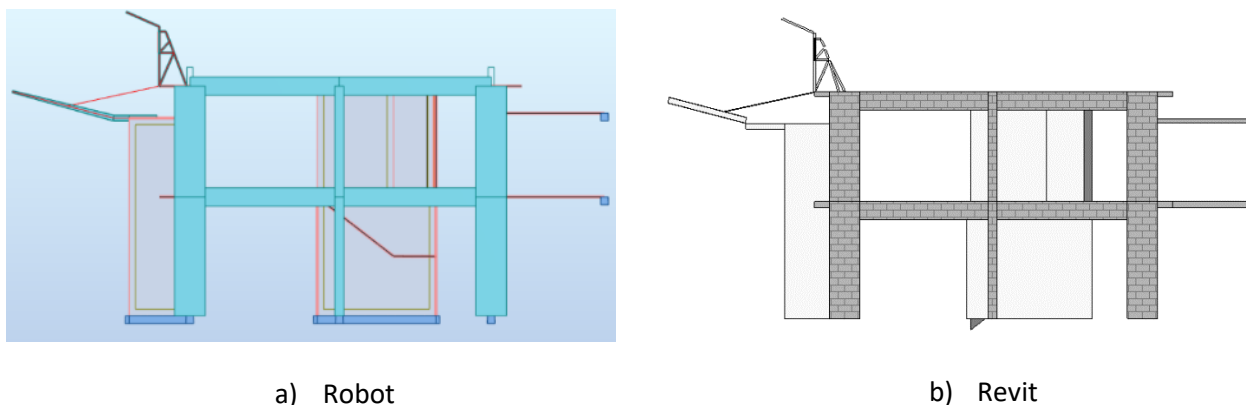


Figura 3.64 – Integração Robot-Revit do caso de estudo 2

Para além dos problemas referidos existem ainda problemas adicionais relativos à passagem dos dados referente às armaduras. Como já foi dito, em lajes as armaduras nem são transferidas e apesar de existir a passagem de armaduras de Robot para Revit, existem alguns cuidados a ter em conta.

Em vigas o processo de passagem pode ser bem conseguido se a modelação personalizada de armaduras em Robot for feita considerando a existência de várias vigas ao invés de uma viga contínua com vários vãos ou se for transferido para Revit a solução de armaduras criadas de forma automática pelo *software* Robot. O problema criado com a personalização de armaduras em Robot é que o Revit deixa de considerar

o encadeamento de vãos e vai atribuir as soluções de todos os vãos da viga contínua a cada vão isolado aquando a passagem, repetindo a entrada de armaduras no modelo Revit. Outro problema que pode ocorrer em vigas é a sobreposição entre as diferentes distribuições de cintas transversais, erro, no entanto, menos comum.

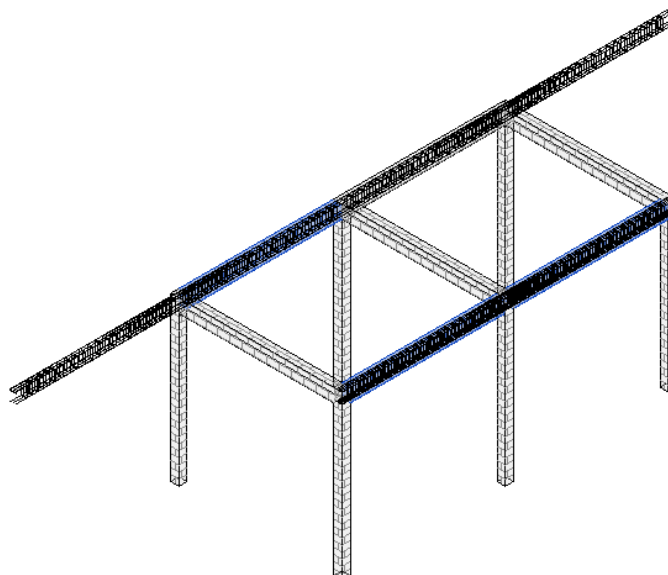
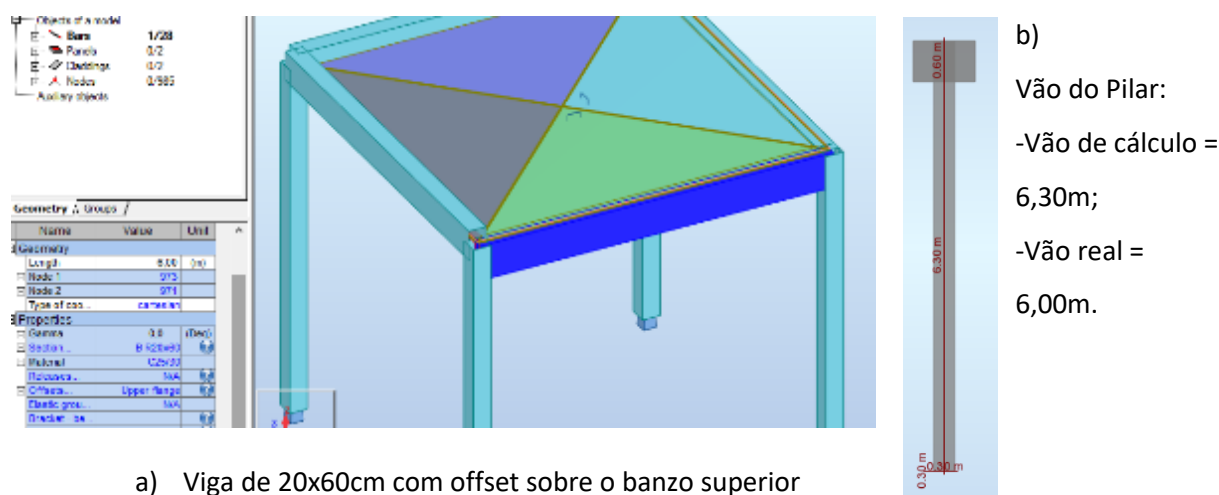


Figura 3.65 – Exemplo de integração de armaduras em Revit a partir do Robot

Em pilares o erro dá-se por culpa do Robot e da maneira como ele assume a geometria da ligação entre os pilares e os restantes elementos (vigas e lajes). O programa assume um acréscimo do vão do pilar equivalente a metade da altura da viga com maior secção ligada ao pilar, mesmo que se faça um *offset* da viga.



a) Viga de 20x60cm com offset sobre o banzo superior

Figura 3.66 – Exemplo de vão de cálculo atribuído em Robot

Como o programa de dimensionamento tem esta particularidade, a passagem para Revit dá-se com este vão em conta e as armaduras acabam por ficar erradamente amarradas.

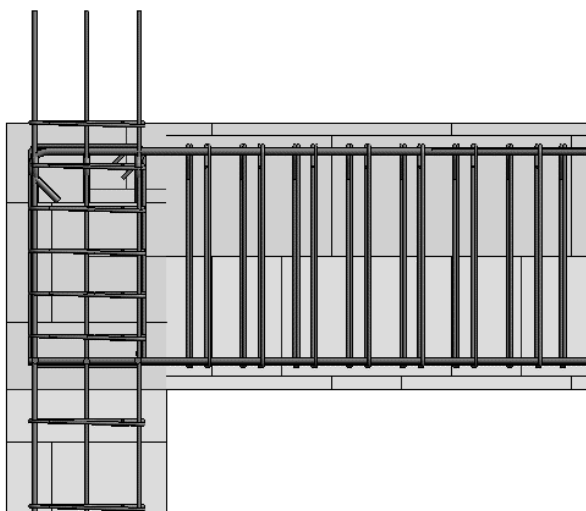


Figura 3.67 – Pormenor de amarração de um pilar armado integrado em Revit a partir do Robot

Em suma, ainda é preciso melhorar esta interoperabilidade. Sendo estes programas desenvolvidos pela mesma empresa é de esperar que surjam novos desenvolvimentos. A Autodesk aparenta ter planos para um novo *software* de análise e dimensionamento, o React Structures (já existe uma versão *preview* do programa onde é possível testar algumas ferramentas mais básicas de modelação e análise estrutural), e é possível que a mudança seja benéfica para a correspondência com o Revit. Para já é necessário compreender as limitações existentes.

A nível do processo de modelação em Revit, as ferramentas existentes já são uma grande ajuda ao processo de criação de armaduras BIM mas os erros e dificuldades ainda existem, contribuindo para um arrastar temporal que hoje em dia não se justifica, prejudicando o utilizador e todo o projeto.

Relativamente à medição e estimativa e custos, o Revit apresenta boas capacidades de medição, sendo, no entanto, necessário dividir as várias classes de medição. O programa cria listas de quantidades em função do que se pede para analisar. Se for pedida a lista de varões é-nos dada a lista com todos os varões e elementos de armadura inseridos no modelo, mas com a possibilidade de filtrar a informação em função da referência à peça onde vão ser instalados ou de outro parâmetro como o diâmetro. Se for pedida a lista de *structural framing* obtêm-se informações relativas a todas as vigas, sejam elas de betão ou de outro material. Assim é possível obter um conjunto de informações relevantes, como o volume de betão ou o comprimento dos varões, entre outras, existindo ainda a possibilidade de passagem destas listas para um formato de texto .TXT.

As listas podem tornar-se extensas devido à categorização por tipo dada pelo programa. Por exemplo, se existem 30 varões de 6mm com 6 metros de comprimento e outros 30 com o mesmo diâmetro, mas comprimentos variados a lista vai discriminar cada um desses elementos. Varões de lajes são considerados individualmente, mesmo que todos tenham o mesmo diâmetro e comprimento.

[illegible]

Figura 3.68 – Exemplo de Inventário de varões

A produção de desenhos em Revit das secções das vigas e dos respetivos perfis longitudinais está dependente do utilizador e obrigam um tratamento da informação. É possível recorrer ao processo de definição de *Assemblies*, que cria um conjunto de vistas para um ou vários elementos, ou podem-se criar cortes em planta para cada elemento; pode ainda ser necessário fazer a duplicação de vistas e ainda “esconder” alguns elementos das vistas e cortes criados para ter um desenho do agrado do projetista.

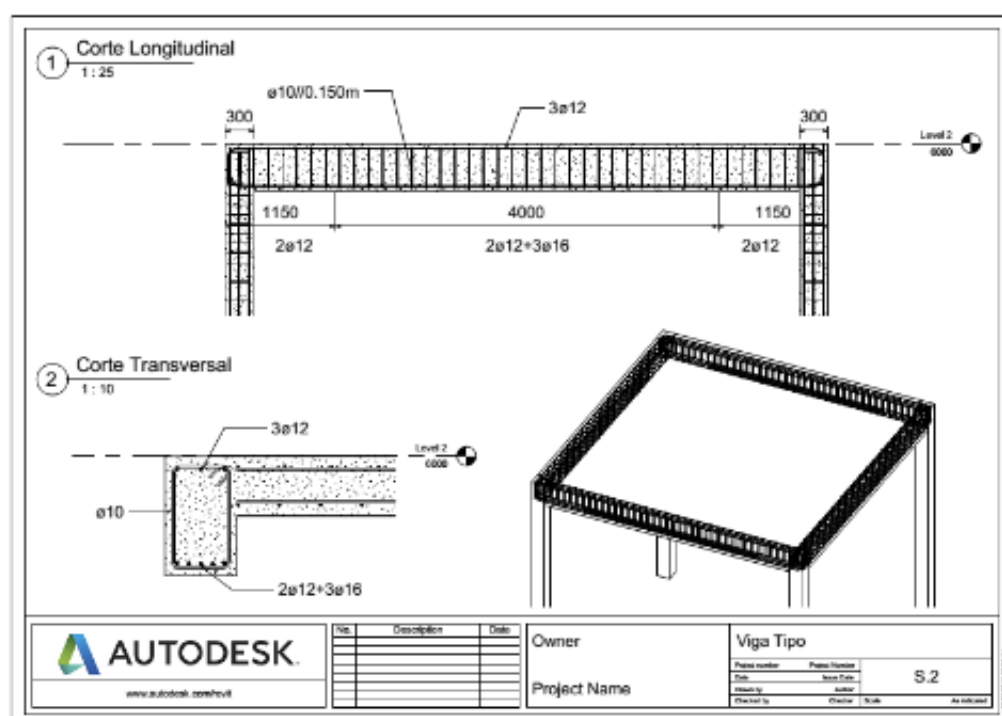


Figura 3.69 – Exemplo de desenho tipo produzido em Revit

Caso as ferramentas disponíveis não sejam suficientes para definir o *template* dos desenhos, o Revit permite exportar todas as vistas que sejam necessárias, garantindo a liberdade de edição e personalização dos desenhos técnicos e a configuração de *layers* para alcançar os melhores documentos possíveis.

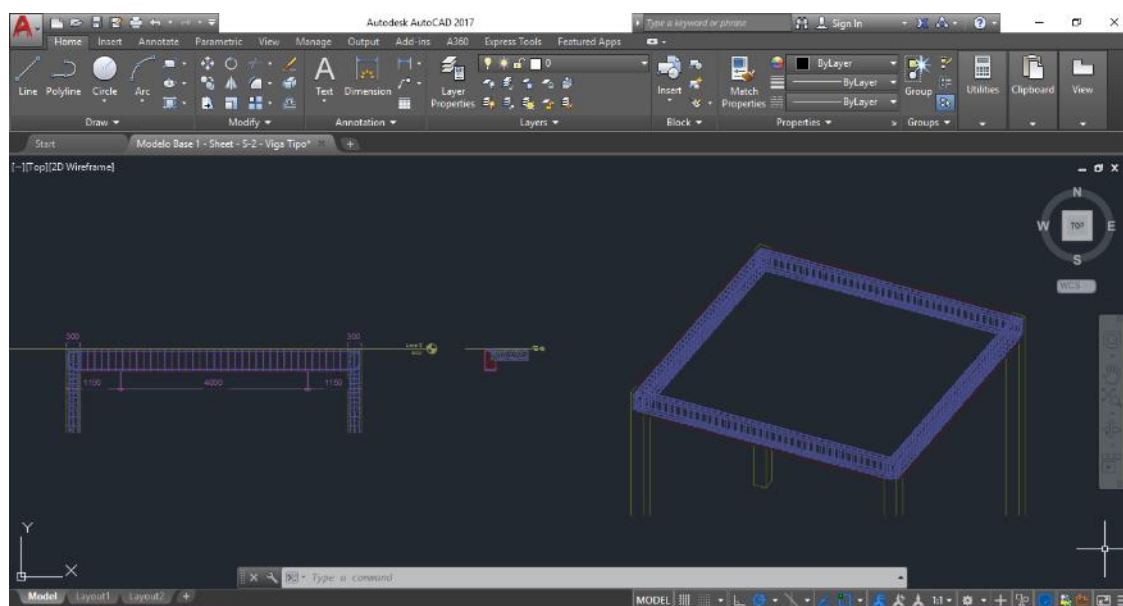


Figura 3.70 – Exemplo de exportação de vistas Revit para AutoCAD

Mais uma vez o programa demonstra a sua versatilidade e capacidades de interoperabilidade. Apesar de existirem alguns problemas na passagem de dados entre alguns dos programas interoperáveis, as possibilidades de edição dão ao utilizador a capacidade de corrigir a maioria dessas falhas. Se não possuir essa capacidade o Revit tem flexibilidade para passar a informação para outros formatos.

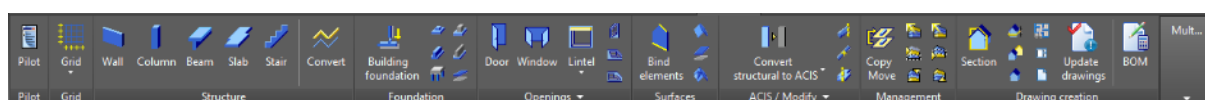
O que não facilita, nem permite a perfeita comunicação, é a existência de diferentes bibliotecas materiais e geométricas, não só entre programas de diferentes empresas, mas entre programas de uma única empresa. Seria desejável a existência de um maior entendimento entre os diversos autores, principalmente quando a marca possui várias aplicações que promovem a interoperabilidade e o conceito BIM. Garantir à partida que existem bibliotecas, formatos de ficheiro comuns e um reconhecimento de geometrias no modelo idênticos, em todos os programas com o selo da empresa, é o primeiro passo para uma aplicação simplificada e sem necessidade de emendas da metodologia BIM. O que por si irá promover uma dinâmica melhorada de conceção e execução de projeto e obra.

A principal conclusão a tirar deste *software* é que apesar de ainda existirem problemas, as soluções para os mesmos existem, mas é preciso o utilizador conhecê-las para decidir qual o melhor caminho para alcançar os melhores resultados no mínimo de tempo possível.

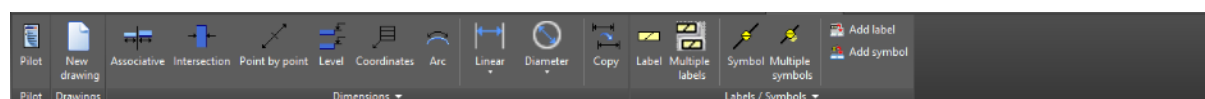
3.3.2 ADVANCE CONCRETE 2017

Este é um *software* que já foi apresentado no capítulo 2, Estado da Arte, e o propósito da sua presença neste capítulo consiste, além do teste das suas capacidades de modelação, em verificar se o fluxo BIM que é referido pela Autodesk possui alguma relevância para o processo de modelação de amaduras.

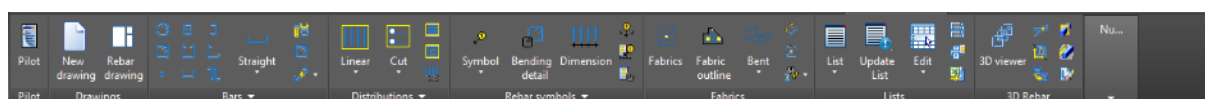
Esta aplicação tem como base o AutoCAD e com isso o utilizador tem acesso a todas ferramentas do programa base, acrescentando, o Advance Concrete, um conjunto de menus com ferramentas específicas de modelação, tanto estrutural como de armaduras.



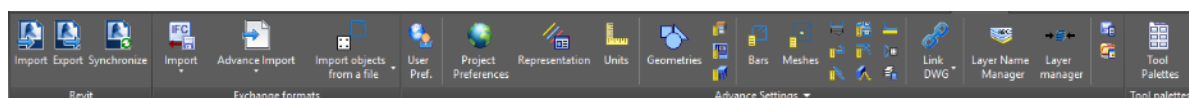
a) AC Model



b) AC Drawings



c) AC Reinforcement

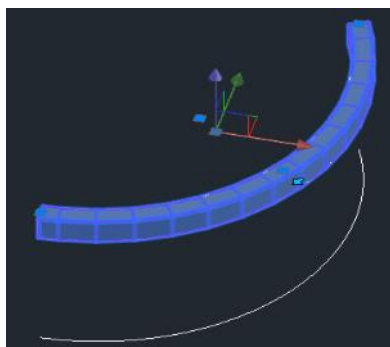


d) AC Tools

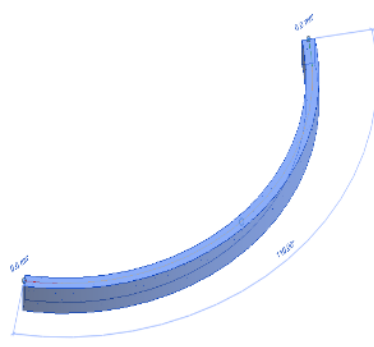
Figura 3.71 – Menus adicionais Advance Concrete

Na figura 3.71 é observável o conjunto de quatro menus específicos do programa. A figura 3.71 a) corresponde ao menu associado às ferramentas de modelação estrutural. Neste menu é dada a possibilidade de criar a maioria dos elementos desejados, com a secção/geometria pretendida. O método de modelação assemelha-se a uma mistura de Robot com Revit. Por exemplo, na criação de uma viga em arco, o arco é criado utilizando a ferramenta *Arc* do AutoCAD para criação de uma linha que é depois convertida em viga recorrendo à função *Convert*, semelhante a Revit que para criar um elemento idêntico obriga a criar uma *model line* com o arco e a criação da viga é feita escolhendo a família de viga a instalar sobre a linha através da opção de modelação *pick line*. A diferença para o Robot é que tanto em Revit como em Advance Concrete a viga em arco é criada como um único elemento, enquanto no primeiro, o *software* precisa de dividir o arco em segmentos. Mas existem alguns pormenores de introdução de elementos parecidos com os que existem em Robot. A semelhança com o *software* de análise encontra-se no formato de seleção de secção e tipo de material com menus de edição das características geométricas e bibliotecas muito semelhantes.

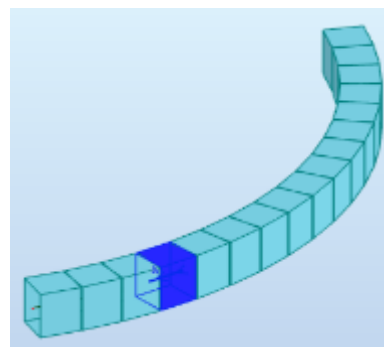
Neste menu também é possível utilizar ferramentas para definição de planos de corte, adicionar novos níveis e criar listas de materiais.



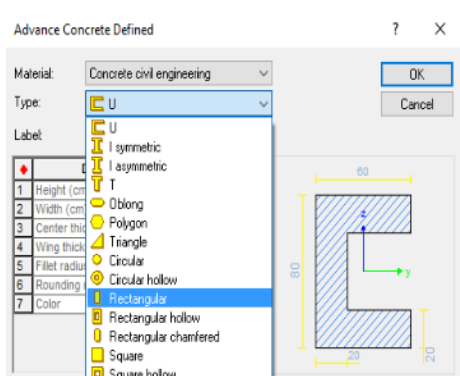
a) Advance Concrete



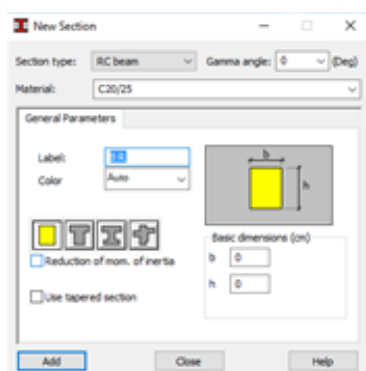
b) Revit



c) Robot Structural Analysis



d) Advance Concrete



e) Robot Structural Analysis

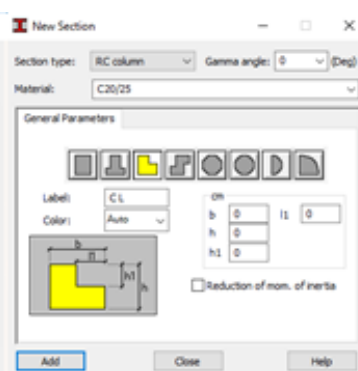


Figura 3.72 – Exemplos de semelhanças entre o Advance Concrete e outros programas da Autodesk

Os menus *AC Drawings* e *AC Reinforcement* são preferencialmente aplicáveis na área de desenhos. Esta é outra das particularidades do Advance Concrete, já que o modelo e os desenhos estão separados, um pouco à semelhança do Revit, sendo as vistas alteradas no menu piloto.

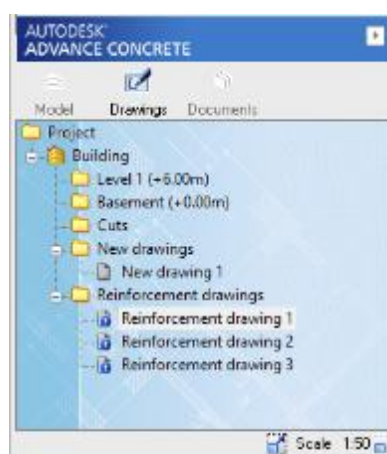
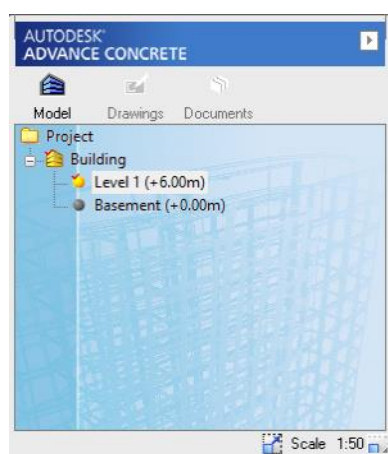


Figura 3.73 – Menu Piloto

As ferramentas *AC Drawings* são sobretudo ferramentas de anotação e legendagem que poucas funcionalidades adicionam às ferramentas de anotação originais do AutoCAD, mas ainda assim existem e podem ser utilizadas, principalmente as de legendagem e introdução de simbologia.

O *AC Reinforcement* possui maior destaque pelas ferramentas de criação de armaduras em elementos de betão armado. Estas ferramentas são equiparáveis às ferramentas de criação manuais do Revit, mas são ligeiramente mais complicadas de aplicar. A criação de elementos é feita em 2D, mas precisa de pelo menos mais uma vista para ser possível o programa criar um modelo 3D da armadura no objeto. Ao pedir a criação do desenho podemos optar por um desenho de pormenor das armaduras ou um desenho de pormenor dinâmico. A primeira opção é conseguida clicando na ferramenta *Rebar drawing*. A segunda, acedendo às *Tool Palettes*, habitualmente disponíveis quando o programa é iniciado, mas também acessíveis a partir do menu *AC Tools*.

Ambas as opções podem conduzir ao mesmo tipo de solução, a diferença é que o dimensionamento dinâmico permite introduzir as armaduras nas vistas selecionando pontos de referência, facilitando a conceção do modelo.



a) Manual

b) Dinâmico

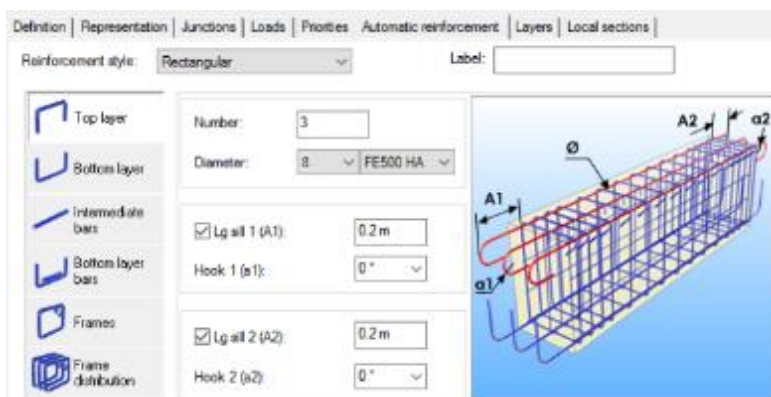
Figura 3.74 – Modos criação de armaduras – Elemento a elemento

No pedido de criação de desenhos, antes de ser criada a folha com os cortes das peças selecionadas, surge uma janela para definição dos parâmetros do desenho. Vão desde a definição do número de cortes, posição dos mesmos, peças isoladas ou contendo os elementos ligados à mesma, margens do desenho, distâncias entre cortes, pesos de linha, cores, legendas, etc.

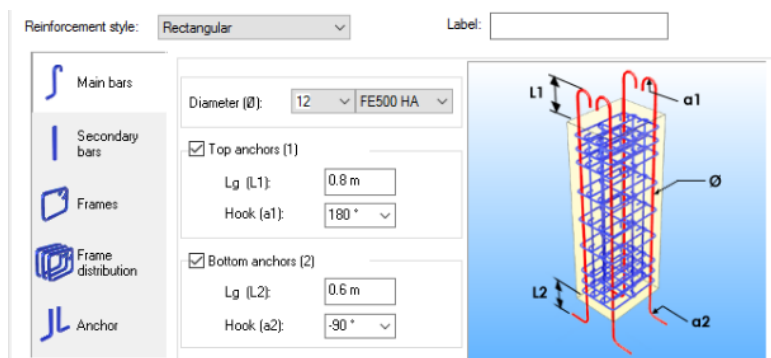
Para facilitar ainda mais a tarefa de definição das soluções a aplicar nos elementos estruturais o programa possui dois modos, o de acesso às propriedades de vigas, pilares, lajes, etc., e o modo dinâmico. O segundo modo não foi aplicado com grande sucesso pelo que será apenas referido o primeiro.

O primeiro modo é executado em dois passos, o primeiro envolve a seleção do conjunto de elementos que pretendemos que tenha uma dada solução de armadura e a entrada na opção *Beam*, *Column* ou *Slab properties* acessível através de um clique com o botão direito do rato na janela de modelação.

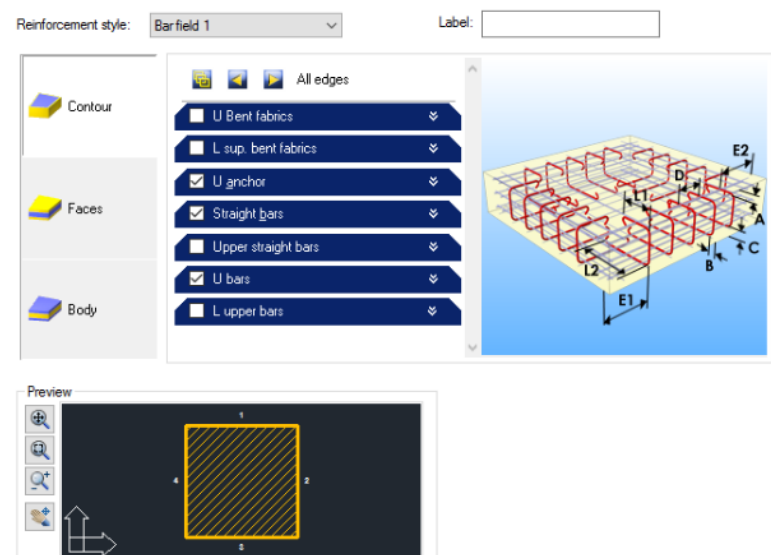
Nessa janela além das opções de armadura automática, ficam igualmente disponíveis outras ferramentas de edição dos elementos, como a definição da secção ou do material e a possibilidade de representação da peça de forma isolada ou com a sua ligação com os elementos vizinhos.



a) Vigas



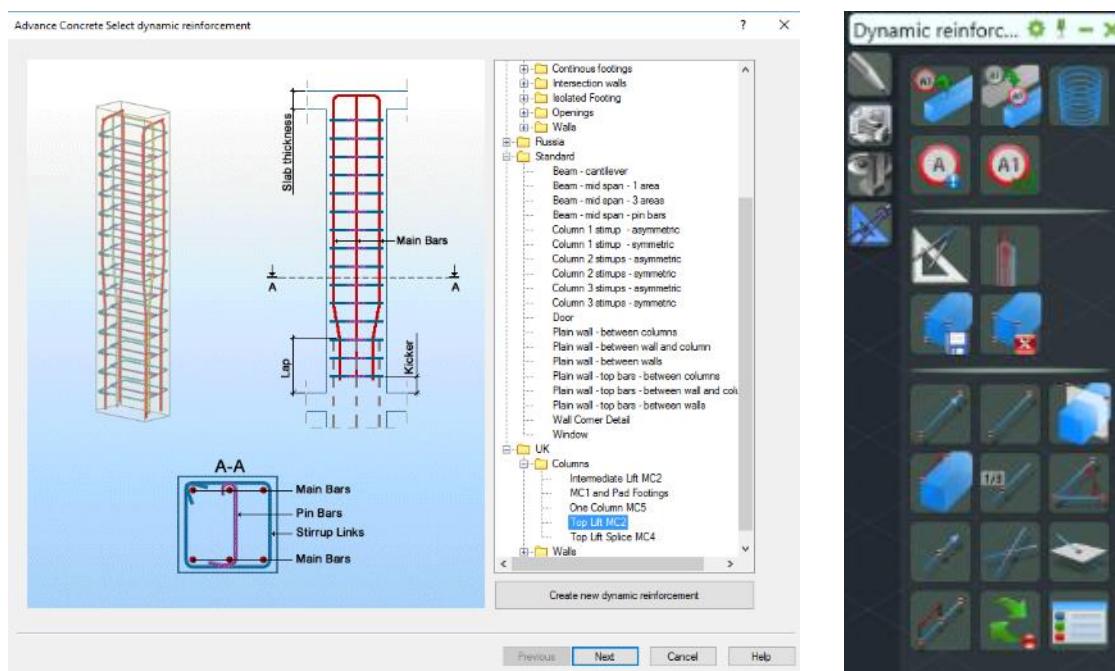
b) Pilares



c) Lajes

Figura 3.75 – Menu para criação de soluções automáticas

Tal como no Revit, as soluções automáticas estão reservadas para um tipo limitado de secção de pilares e vigas, assim como só as lajes maciças podem ser automaticamente reforçadas. Apesar destas limitações, o programa tem mais opções de edição automáticas nas lajes, com a introdução dos elementos de ligação a paredes e a criação da armadura regular e de pele simultaneamente. Em vigas perde-se a opção de criar uma armadura pontual em linha com a armadura base, mas ganha-se a possibilidade de agregar varões e a introdução de armar níveis intermédios da viga. Em pilares é dada a opção de criar armaduras de amarração a sapatas, mas perdem-se outras opções de amarração existentes em Revit. Algumas destas opções que não são acessíveis pelas propriedades dos elementos são, em teoria, modeláveis em modo dinâmico.



a) Menu de definição de armaduras

b) Tool palettes

Figura 3.76 – Modo de modelação dinâmico

Alguns problemas que podem ocorrer com a criação automática são sempre facilmente resolvidos através de alguma edição manual dos elementos. Por exemplo, após a aplicação da configuração da armadura num elemento, o programa tem um *bug* que causa o deslocamento da peça no modelo global, a solução é utilizar o comando *move* e colocá-la de novo na sua posição original ou anular a ação. Outro problema que pode surgir é o deslocamento das armaduras, ou o prolongamento das mesmas para o exterior da peça ou ao longo de zonas que não deviam ter determinado tipo de armadura (estribos de uma viga a entrar num nó de um pilar por exemplo). Estes problemas têm de ser resolvidos manualmente, com a edição desses elementos no respetivo desenho. Ao alterar uma das vistas as outras adaptam-se automaticamente o que torna o processo mais rápido, mas ainda assim são problemas que causam alguns transtornos. A armadura automática não é aplicável a elementos com inclinação vertical.

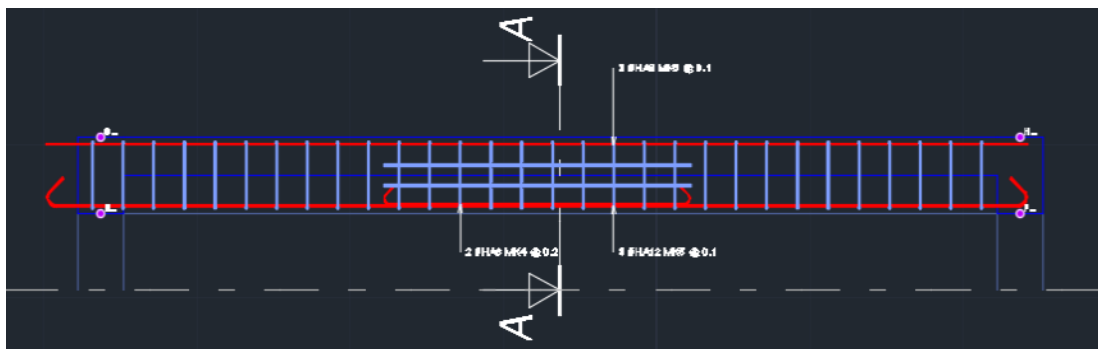


Figura 3.77 – Exemplo de problema da criação automática de armaduras

Convém também referir que as armaduras são criadas tendo como dimensão do vão o comprimento até ao centro dos apoios e só atribui comprimento de amarração a partir desse ponto e não a partir da face do apoio. Se o utilizador não tiver em conta esse pormenor, mais facilmente incorre no erro de definir uma amarração incompatível com o desenho CAD ou uma distribuição de cintas/estribos prolongados de forma indesejada.

Comparando a possibilidade de visualização tridimensional, a primeira grande diferença entre o Advance Concrete e o Revit, ou o Robot, é que este é baseado numa modelação em CAD, apesar de apresentar modelos tridimensionais, todos os elementos modelados têm um formato CAD e como tal existe um problema de passagem dos elementos de armadura para *software* BIM, mas este é um problema que irá ser abordado após a demonstração das capacidades de visualização.

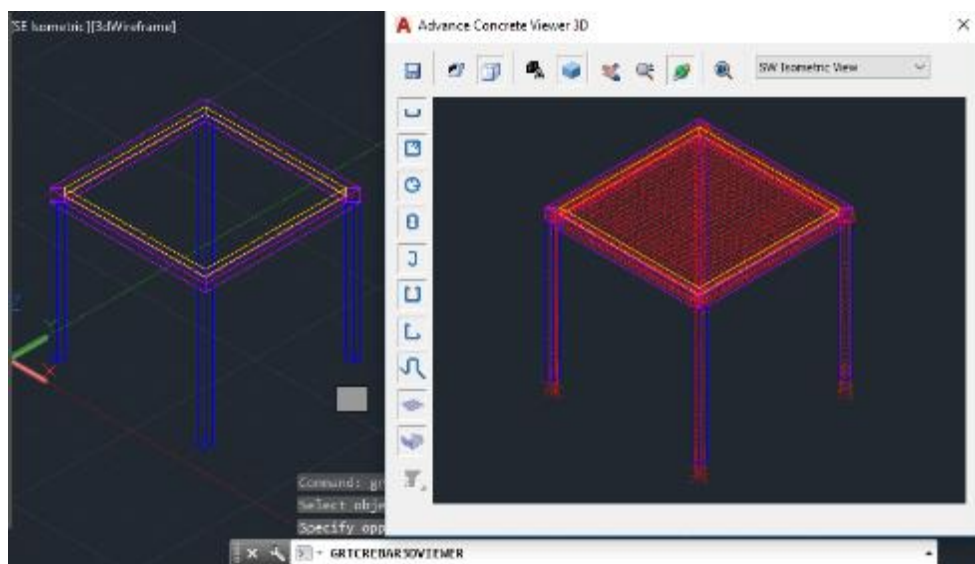
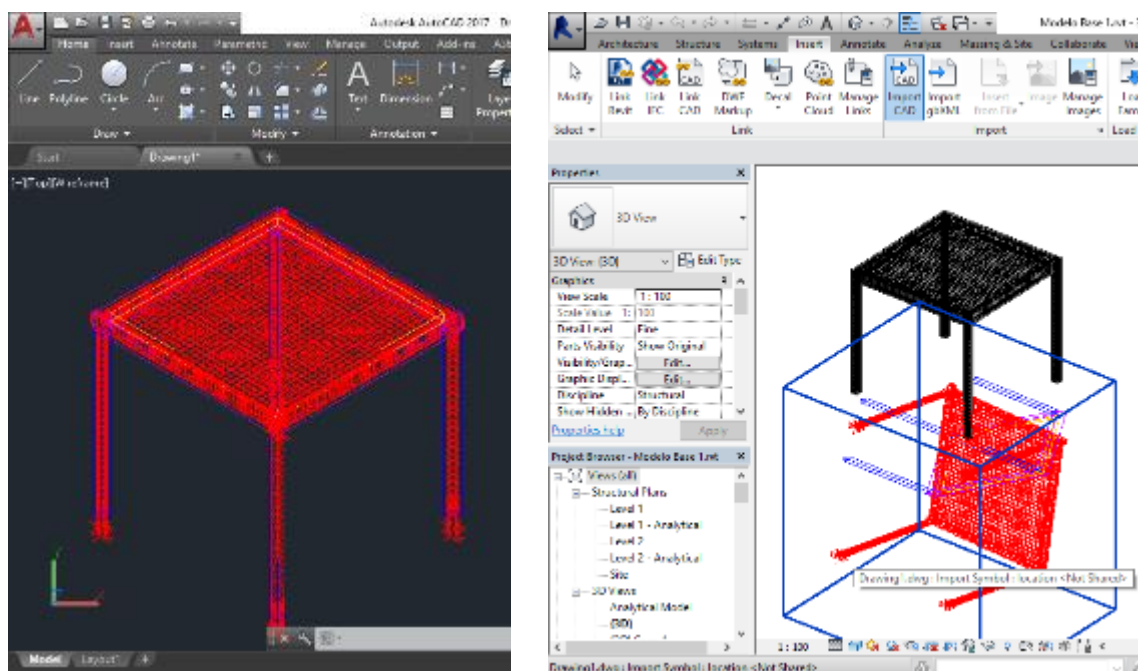


Figura 3.78 – Demonstração do 3D Viewer do Advance Concrete

Após a criação dos desenhos com todos os elementos de armadura passa a ser possível utilizar o comando *3D Viewer* do menu *AC Reinforcement*. Este comando abre uma nova janela sobre a interface de modelação inicial. Esta nova janela permite visualizar todos os elementos selecionados com as respetivas soluções de armadura e selecionar quais os tipos de armadura que se deseja ter presentes na imagem,

assim como o tipo de perspectiva. Também é nesta janela que existem as opções de criação do modelo tridimensional das armaduras. Entre as opções para criação temos a possibilidade de criar o desenho 3D no mesmo ficheiro ou de exportar o mesmo para um ficheiro isolado. Ambos rebatem o modelo das armaduras segundo o eixo global XY, o que torna a sua utilidade, enquanto elementos BIM, quase redundante. Uma vez que a importação destes elementos como .DWG para o modelo Revit é feita em bloco e a modificação de elementos isolados fica bloqueada, o rebatimento sobre um novo eixo também afeta a importação do modelo.



a) Modelo de armaduras exportado para AutoCAD

b) Importação do modelo de armaduras para Revit

Figura 3.79 – Modelo de Armaduras Advance Concrete

Ainda associado à passagem de dados, já se viu que esta não é feita da forma mais vantajosa no que toca a elementos de armadura. Resta verificar se existe alguma vantagem na passagem entre modelos estruturais.

O menu *AC Tools* (Figura 3.71 d)), além das ferramentas para gestão de *layers*, bibliotecas e de preferências de projeto, possui as ferramentas de importação/exportação de modelos. Os formatos utilizados na integração dos modelos no ambiente do Advance Concrete são o .IFC e o .SMLX, existindo ainda a hipótese de sincronizar o Advance Concrete com o Revit a partir dos ficheiros .SMLX.

A primeira grande diferença entre os modelos tridimensionais Advance Concrete e Revit é que enquanto no segundo, o modelo pode englobar a totalidade do projeto, ou seja, todos os elementos de todos os níveis definidos podem ser editados numa só vista 3D, no primeiro isso não é possível. A vista 3D apresenta somente os elementos que estejam associados a esse plano de trabalho.

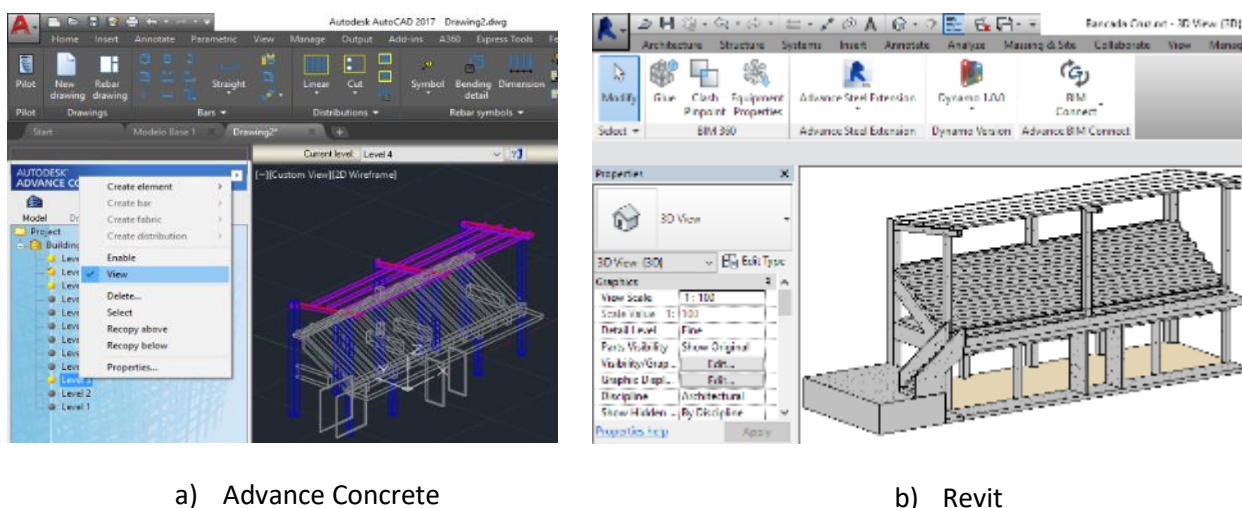


Figura 3.80 – Vistas 3D

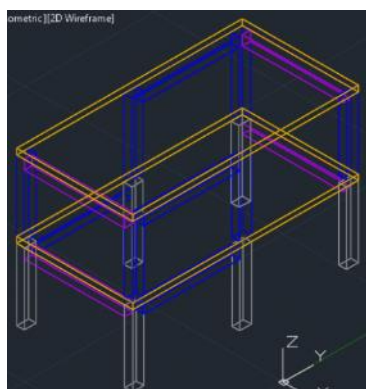
Ainda assim, o programa habilita a visualização dos restantes níveis em conjunto com o nível selecionado em modo de edição, desde que selecionada a opção *View*, acessível com o botão direito do rato. O *3D Viewer* funciona do mesmo modo e apresenta todos os elementos que estejam selecionados.

Relativamente à passagem de dados, o programa pode ter alguns problemas. A passagem por IFC vai depender da forma como o IFC é criado. O Revit permite criar IFC's através da exportação mais habitual do programa, ou através de um *Add-in* intitulado *Advance Steel Extension*. Os problemas mais comuns da exportação por IFC, sem recurso ao *Add-in*, são relativos ao reconhecimento de geometrias; o Advance concrete não reconhece as dimensões ou formas reais dos objetos e não compatibiliza a união entre as diversas peças estruturais. Os problemas do *Add-in* também são relativos a geometrias, mas por falta de entendimento dos vãos reais ou da posição das peças.

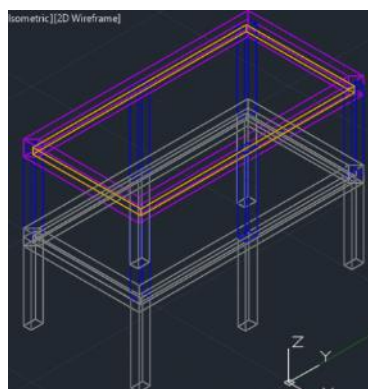
Primeiro convém perceber que tanto o formato IFC como o SMLX criados pela extensão são idênticos no que toca ao tipo de dados e comunicação com o Advance Concrete. A diferença é que utilizando o formato SMLX, como este é criado com base em bibliotecas de dados, o programa pode não reconhecer as referências do modelo e não ser capaz de o recriar em CAD. O IFC não aparenta ter esse tipo de problemas, mas pode ter elementos em falta, como por exemplo uma viga.

O problema das geometrias tem a ver com os eixos de ligação das peças. Ao fazer a passagem pelo *Add-in*, o Advance Concrete assume que a ligação entre os elementos é feita segundo os eixos de simetria dos diversos elementos, ou seja, uma laje não vai repousar sobre o banzo superior de uma viga mas sim sobre o seu eixo de simetria, o modelo fica semelhante ao modelo de cálculo tridimensional apresentado em Robot. Outro pormenor é o facto de não existir passagem de dados relativos às armaduras que já possam ter sido modeladas e o Revit, algo que poderia ser útil para facilitar a produção de desenhos de pormenor.

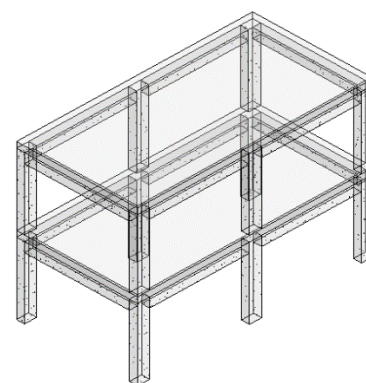
Estes problemas ocorrem se considerarmos o sentido Revit→Advance Concrete, mas se procedermos à modelação pelo sentido inverso existem problemas semelhantes com elementos a ser reposicionados em Revit após a transmissão do modelo Advance Concrete.



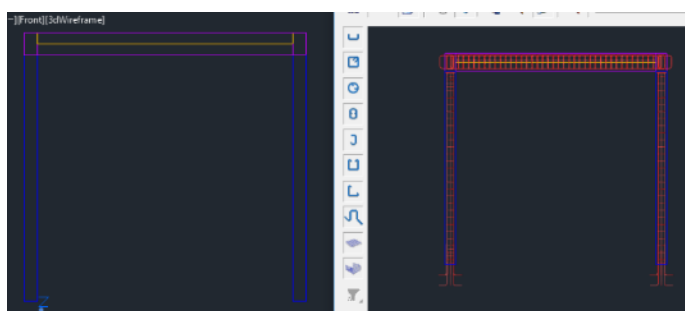
a) IFC



b) Advance Steel Extension



c) Revit 1



d) Advance Concrete

e) Revit 2

Figura 3.81 – Exemplos de interoperabilidade Revit↔Advance Concrete

A figura 3.81 serve de referência aos problemas detetados com alguns exemplos práticos dessas pequenas falhas.

Para finalizar a análise deste *software* resta abordar as capacidades de quantificação e de orçamentação do mesmo. No aspeto da quantificação, este software distingue-se pela positiva no que respeita a apresentação de dados relativos a volumes de betão, áreas de cofragem e orçamentação desses materiais. Os dados relativos a armaduras são semelhantes às listas de materiais que o Revit cria. Apesar das listas de materiais para elementos de aço serem semelhantes, a lista relativa aos betões é bastante completa e apresenta informações relevantes e úteis para uma estimativa orçamental detalhada.

A opção *Bill Of Materials* (BOM) encontra-se disponível no menu *AC Model* e cria automaticamente um documento Word (.DOCX) com a quantificação de todos os elementos selecionados.

As Listas de materiais referentes às armaduras podem ser criadas através do modelo ou das vistas de desenhos de pormenor. Podem ser implementadas no desenho, impressas, exportadas como PDF ou ficheiro Excel. As ferramentas estão acessíveis no menu *AC Reinforcement* e só criam a lista relativa aos

elementos selecionados. As opções são a *List* ou o *Material Manager* sendo que a primeira cria listas a partir dos desenhos de pormenor e a segunda, a partir do modelo tridimensional da estrutura.

AUTODESK.

Bill of materials

Price

| C20/25 | | | |
|--------------|---------------|----------------------|----------------|
| Element | Quantity (m3) | Unit price (Euro/m3) | Price (Euro) |
| Slab | 9 | 100.62 | 905.58 |
| Beam | 3.6 | 102.14 | 367.70 |
| Column | 2.16 | 121.96 | 263.43 |
| Total | 14.76 | | 1536.72 |

| Formwork | | | |
|--------------|---------------|----------------------|----------------|
| Element | Quantity (m2) | Unit price (Euro/m2) | Price (Euro) |
| Slab | 36 | 19.82 | 713.52 |
| Beam | 32.76 | 41.16 | 1348.40 |
| Column | 28.8 | 47.26 | 1361.09 |
| Total | 97.56 | | 3423.01 |

a) Exemplo de um relatório para elementos de betão (parcial)

| Steel Grade | Shape Code | Diameter | Bar Mark | Total Quantity | A | B |
|-------------|------------|----------|----------|----------------|-------|-------|
| | | | | | (m) | (m) |
| FE500 HA | 5.2 | Ø6 | 1 | 124 | 0,22 | 0,22 |
| FE500 HA | 5.2 | Ø8 | 2 | 12 | 0,24 | 0,24 |
| FE500 HA | X.XX | Ø12 | 3 | 16 | | |
| FE500 HA | X.XX | Ø6 | 4 | 32 | | |
| FE500 HA | X.XX | Ø12 | 5 | 16 | | |
| FE500 HA | X.XX | Ø12 | 6 | 16 | | |
| FE500 HA | 5.2 | Ø10 | 7 | 160 | 0,22 | 0,42 |
| FE500 HA | 2 | Ø16 | 8 | 12 | 6,3 | |
| FE500 HA | 2 | Ø12 | 9 | 12 | 6,3 | |
| FE500 HA | 0 | Ø12 | 10 | 33 | 5,59 | |
| FE500 HA | 0 | Ø10 | 11 | 29 | 5,6 | |
| FE500 HA | 0 | Ø12 | 12 | 33 | 5,62 | |
| FE500 HA | 0 | Ø10 | 13 | 29 | 5,62 | |
| FE500 HA | 0 | Ø16 | 14 | 7 | 3,91 | |
| FE500 HA | 0 | Ø12 | 16 | 1 | 3,91 | |

b) Exemplo de lista de materiais para varões de aço

Figura 3.82 – *Bill Of Materials* (BOM) do Advance Concrete

Relativamente a esta aplicação, as ferramentas disponíveis são bastante úteis para definição de soluções em elementos de betão armado, quantificação e orçamentação. Mas os problemas de interoperabilidade acabam por perturbar o fluxo de trabalho. Isto acaba por deixar o programa como uma opção viável para uso isolado, mas pouco fiável numa utilização conjunta com outras aplicações.

3.3.3 TEKLA STRUCTURES LEARNING 2016

A última aplicação a ser analisada pertence à *Trimble* e, à semelhança do seu concorrente de modelação também aqui analisado, o Revit, tem capacidade para modelar uma estrutura e todos os materiais constituintes, armazenar toda a informação de projeto e transmitir esses dados em formatos BIM.

Apesar de se referir o Revit como concorrente direto, existem diferenças nos objetivos de utilização dos dois programas. O Revit é um programa com capacidades de integração de projetos multidisciplinares, desde o projeto de arquitetura ao projeto de climatização, o Tekla structures apesar de ser capaz de modelar qualquer material, não possui módulos específicos para modelação noutras áreas que não as de pormenorização de estruturas de aço e betão e criação de ficheiros para fabrico, áreas onde o *software* se destaca comparativamente ao rival da *Autodesk*.

A versão analisada foi a versão para estudantes mais recente, no início deste estágio a versão existente era a 21.1, mas, entretanto, foi lançada a versão 2016. Esta versão traz algumas modificações visuais na interface do programa e melhorias a algumas das funções existentes. As modificações na interface tornaram a primeira aproximação ao programa mais atrativa com menus mais dinâmicos e intuitivos.

Apesar desta nova apresentação a aplicação manteve a sua essência com a interação entre o utilizador e o programa a permanecer praticamente inalterada em termos de controlos e comandos. Comparando novamente com o Revit, o Tekla Structures, apesar do *upgrade* visual, não é tão intuitivo no seu uso e para fazer a sua correta utilização é dedicar mais tempo para compreender as ferramentas e o modo de aplicação das mesmas.

A utilização da versão estudante tem algumas limitações relativamente à versão profissional, sendo as mais relevantes a incapacidade de testar a interoperabilidade entre o Tekla e um programa de análise e dimensionamento e a impossibilidade de gerar documentos para fabricação. Estas limitações acabam por não ser graves para o desenvolvimento desta dissertação, uma vez que as funcionalidades disponíveis são suficientes para realizar um teste às capacidades de modelação e medição de quantidades do *software*.

Iniciando a temática da modelação, o programa apresenta algumas semelhanças com os outros programas testados na elaboração deste documento. Por exemplo, a apresentação dos elementos tridimensionais é semelhante ao *layout* do Advance Concrete. A diferença entre o Tekla e as restantes aplicações é que este não deixa modelar livremente no espaço tridimensional, o utilizador é obrigado a definir uma grelha para edição e criação de elementos. Estas grelhas são semelhantes às que podem ser definidas em Robot ou Revit, mas só em Tekla é que somos obrigados a defini-las. Em função das grelhas definidas, o programa tem capacidade para criar um conjunto de vistas em alçado, planta e tridimensional do modelo.

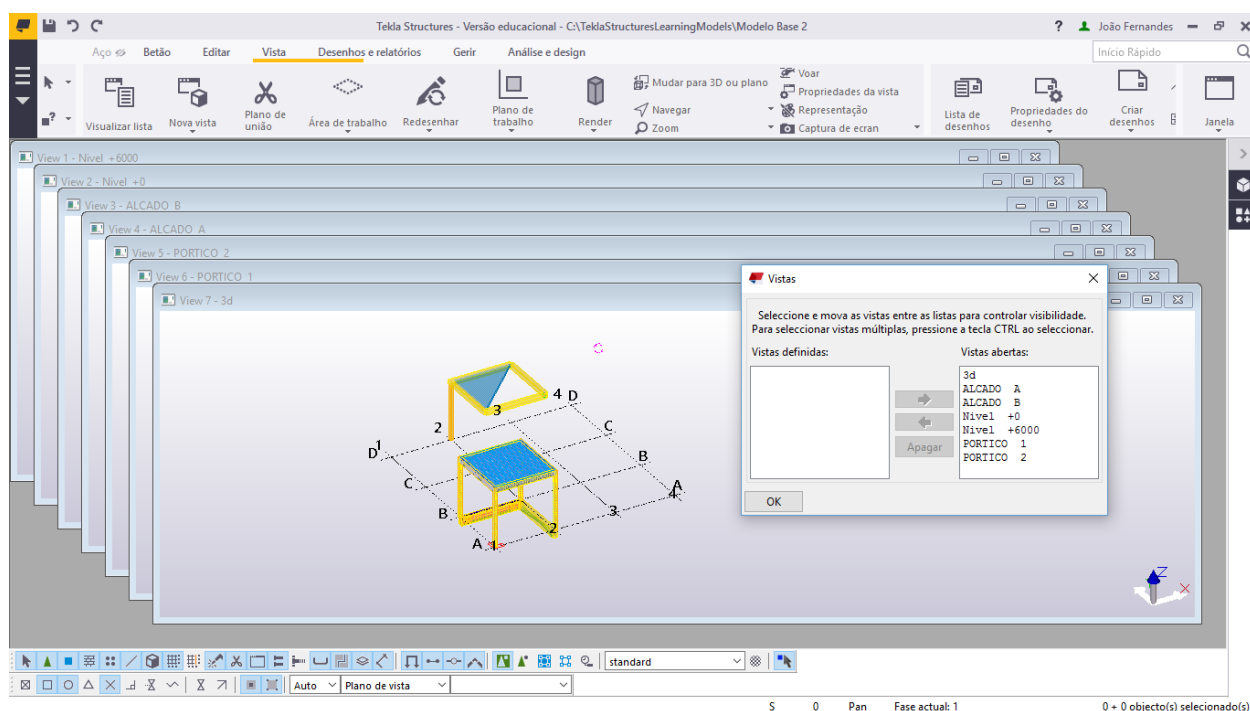


Figura 3.83 – Exemplo de interface e definição de vistas em Tekla Structures Learning 2016

A modelação em Tekla segue o mesmo princípio de outros programas do género, com a alteração ou criação de um elemento numa dada vista a ser automaticamente efetuada em todas as janelas de edição criadas.

As ferramentas de modelação de elementos de betão são bastante simples de usar, bastando seleccionar o tipo de elemento, seja uma viga ou um pilar, e seleccionar um ou dois pontos para criar o objeto. Em paredes, existe a necessidade de escolher um ponto para definir o plano de desenvolvimento da altura do painel em relação ao eixo formado pelos dois pontos inicialmente seleccionados enquanto em lajes é uma questão de definir o contorno da mesma.

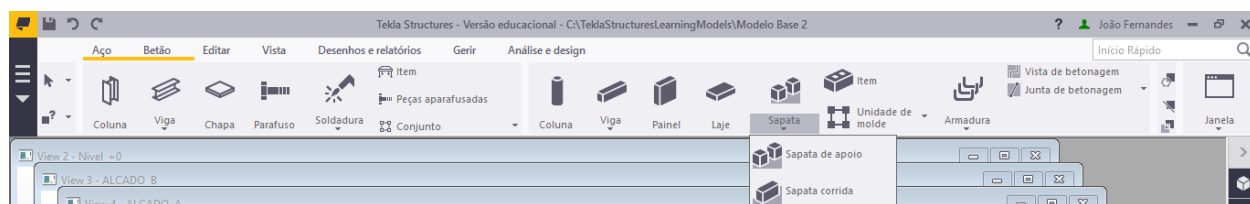


Figura 3.84 – Menus para criação de elementos em aço ou betão

A criação de elementos mais complexos, como vigas em arco por exemplo, pode ser efetuada recorrendo às ferramentas de modelação de elementos de aço, onde já existe a opção de modelar elementos em arco ou através do menu de propriedades. A alteração das propriedades dos objetos permite que se altere a composição material, o tipo de secção do mesmo, o posicionamento e a geometria da peça. A criação de um elemento em arco é feita definindo o raio de curvatura e o número de segmentos.

Uma visita às propriedades do objeto, clicando duas vezes sobre a peça ou através do botão direito do rato, leva-nos às bibliotecas de perfis e de materiais disponíveis.

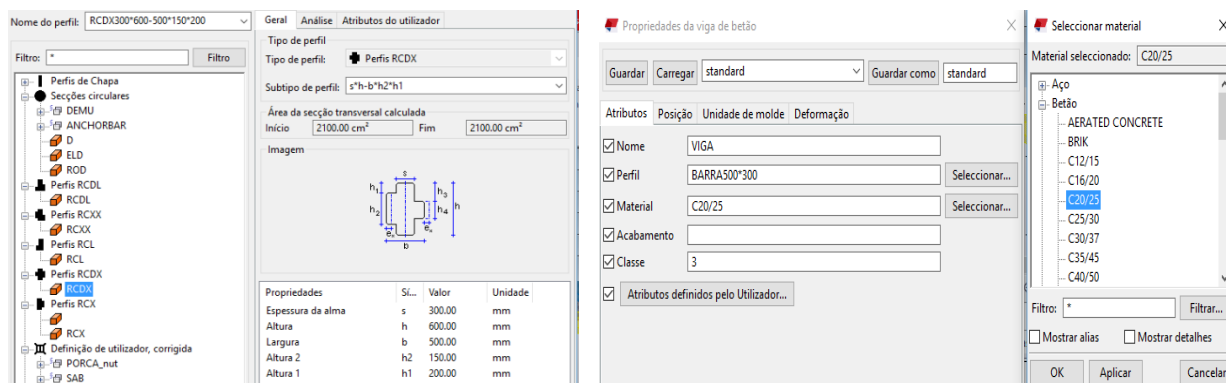
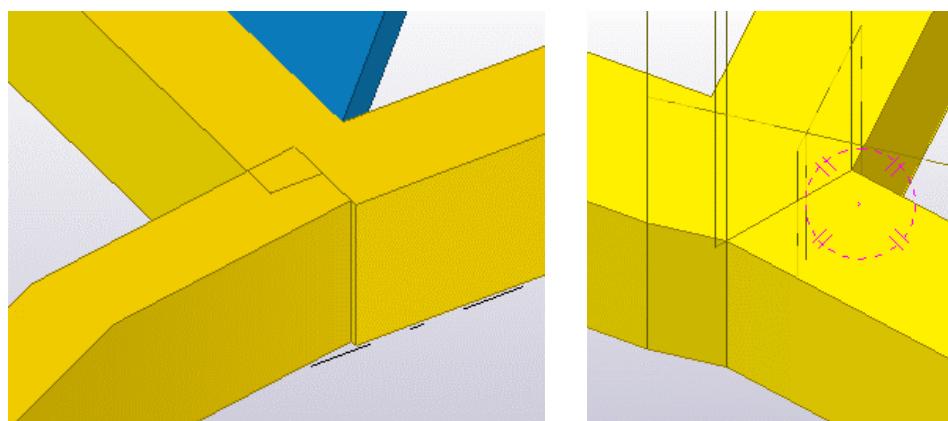


Figura 3.85 – Bibliotecas de materiais e secções, e menu de propriedades de uma viga de betão

É possível ver na figura 3.85 que o Tekla já possui uma biblioteca com perfis de viga mais complexos no seu pacote de dados mais básico, não sendo necessária a importação de novas bibliotecas ou a criação de novos tipos de perfil.

A ligação entre os diferentes elementos é conseguida de forma semelhante ao Revit, mas as ferramentas de correção de geometrias são mais simples de aplicar e o resultado final mais fácil de alcançar.



a) Ligação sem ajuste

b) Ligação com ajuste

Figura 3.86 – Exemplo de ligação entre vigas de betão

Existem outros pormenores interessantes do programa relativamente à modelação de elementos de betão como a definição da unidade de molde de cofragem, com identificação do tipo de molde (*"in situ"* ou pré-fabricado) e a fase de betonagem, ou definição de juntas de betonagem que podem ser inseridas nas zonas de interesse com comentários informativos. Estas juntas associadas às unidades de molde vão permitir definir o faseamento construtivo da estrutura.

Ainda associado à fase de modelação estrutural existe a possibilidade de criar estruturas em função de uma arquitetura importada. Entrando assim no universo BIM, temos a interoperabilidade Tekla, aqui com

a ligação com outros programas a partir de ficheiros em formato .IFC, relacionada com a fase de importação e reconhecimento de dados.

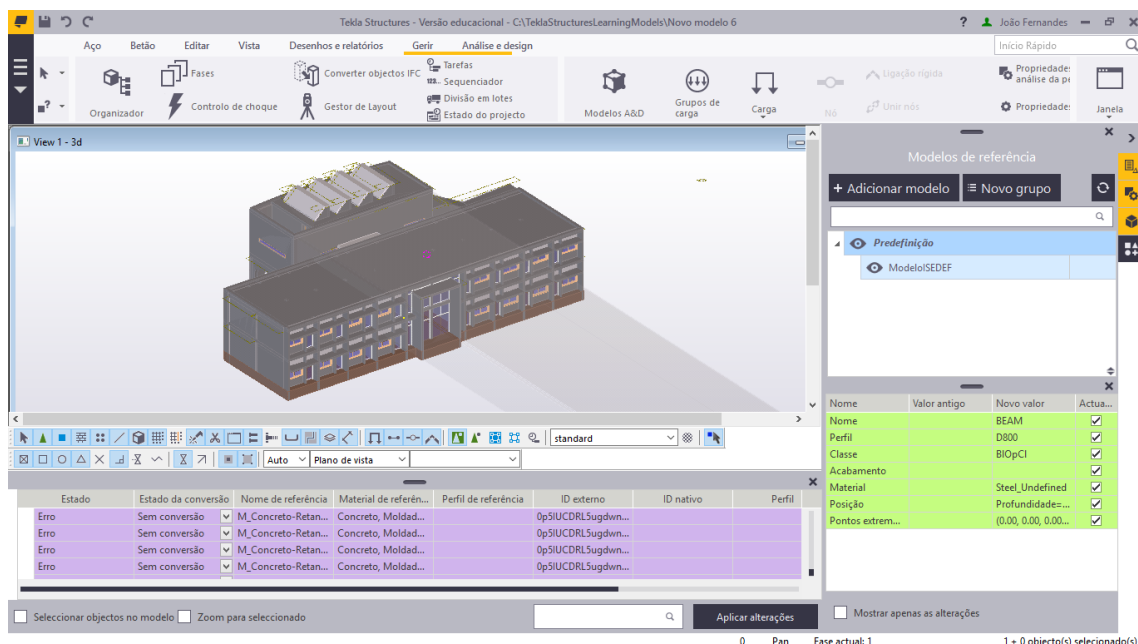


Figura 3.87 – Importação do modelo do caso de estudo 2 em formato .IFC para Tekla

A importação do modelo é feita a partir da adição de um modelo de referência, opção disponível no canto superior direito da janela de modelação, logo abaixo da barra de ferramentas, identificado por um símbolo representativo de um cubo em perspetiva isométrica. A importação não fica limitada ao formato .IFC, sendo possível a importação de ficheiros do tipo .DWG ou outros demais formatos compatíveis.

Semelhante a outro programa da Trimble, o Tekla BIMsight, o reconhecimento de geometrias e informação dos objetos no ficheiro é praticamente perfeita, existindo sempre a possibilidade de ter pequenas falhas no reconhecimento dos objetos. A título de exemplo refere-se uma parede da caixa de escadas do caso de estudo 2 que por algum motivo é reconhecida de forma incorreta.

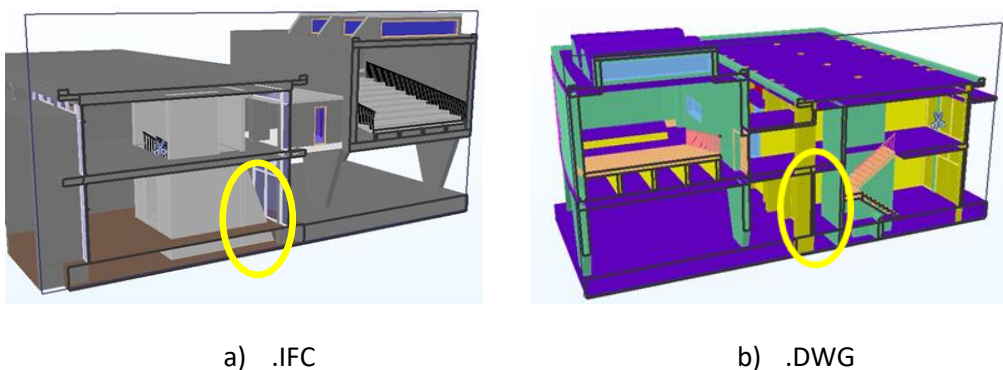


Figura 3.88 – Reconhecimento de dados na importação de modelos em diferentes formatos

Na figura 3.88 a) é visível uma pequena extensão de uma das extremidades de uma das paredes laterais do modelo, algo que não acontece no modelo em formato .DWG.

Ignorando por momentos a possibilidade de passagem de forma incorreta das geometrias, o Tekla tem uma ferramenta para conversão de objetos .IFC para o formato nativo do *software* dando ao utilizador a possibilidade de modificar as secções e outros parâmetros geométricos.

Na figura 3.87 apresenta-se o exemplo de conversão do caso de estudo 2, mas tal como na passagem do .IFC, a conversão também está sujeita a erros e a uma conversão de informação de forma incorreta. Mesmo a conversão dos elementos não escapa incólume tendo o caso de estudo algumas paredes e lajes do anfiteatro a serem convertidas com dimensões que não são compatíveis com a informação do modelo .IFC e se sobrepõem a outros elementos (elementos com maior transparência presentes na figura 3.87).

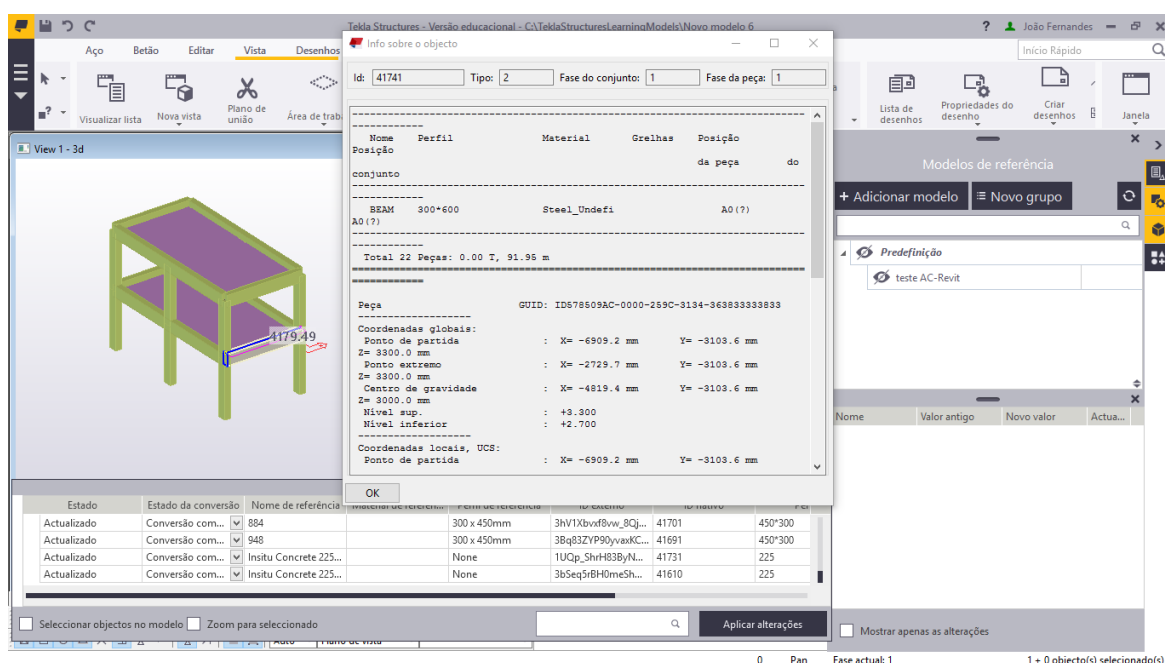
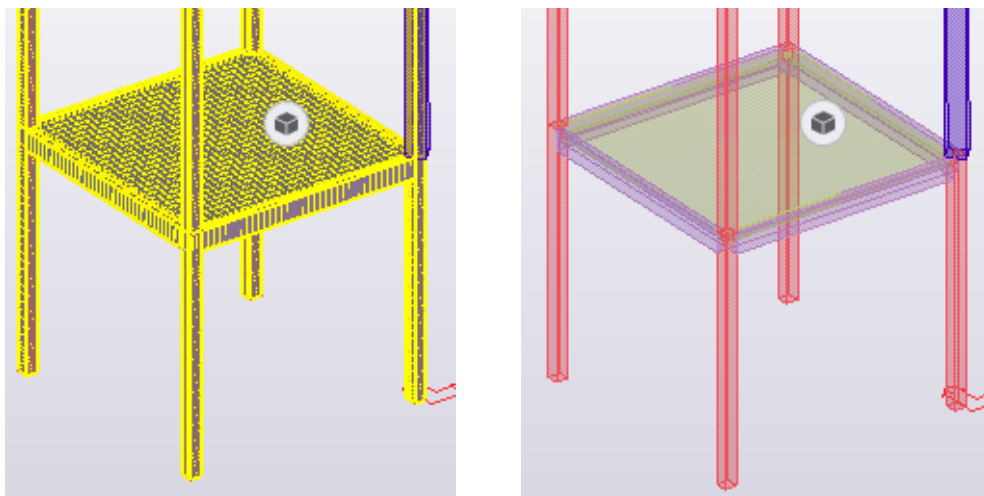


Figura 3.89 – Exemplo de importação “bem-sucedida”

Na figura 3.89 temos um caso de importação sem defeitos geométricos a partir de um ficheiro .IFC, mas apesar de não existirem falhas geométricas, seja na importação ou na conversão do modelo, existe ainda a possibilidade da informação sair adulterada na conversão. A imagem mencionada é um bom exemplo disso mesmo. Tendo como referência uma das vigas do modelo, o objeto em causa é um elemento de betão que, no entanto, foi reconhecido como um elemento de aço. Não foi concluída com sucesso a conversão de modelos com armaduras criadas em Revit, o modelo IFC era capaz de reconhecer a existência das armaduras, mas a conversão não.

Estes problemas de conversão podem estar relacionados com a não correspondência entre bibliotecas materiais e/ou geométricas de cada programa, tal como acontece com a interoperabilidade entre programas da Autodesk. A maneira como cada programa reconhece a informação acaba por ser relevante no resultado final desta interoperabilidade e apesar de o modelo IFC garantir que existe uma transformação de dados para elementos, em teoria, reconhecidos de igual forma pelas diversas

aplicações, ainda não existe uma garantia de que a informação reconhecida seja convertida da maneira correta.



a) IFC com armaduras

b) Conversão para elementos nativos

Figura 3.90 – Conversão de modelo IFC com armaduras em Tekla Structures Learning 2016

Introduzindo o tema da modelação de armaduras em Tekla, semelhante ao que já foi visto em Revit, o programa dá ao utilizador a possibilidade de introduzir elementos de armadura de forma manual ou automática, recorrendo a extensões semelhantes às que foram testadas nos programas anteriores.

Comparativamente ao que já foi testado, o Tekla foi o programa que se mostrou como o mais versátil para a implementação deste tipo de elementos num modelo estrutural. Tanto a nível de extensões como em colocação manual as possibilidades de edição e o conjunto de ferramentas parecem mais completas e têm algumas vantagens face aos programas já utilizados. A primeira dessas vantagens é a capacidade de introduzir os elementos de forma manual diretamente no modelo tridimensional, não sendo necessário definir cortes ou vistas específicas de uma dada peça e a introdução pode ser feita recorrendo a um menu para definição de parâmetros, como o tipo de armadura (longitudinal ou transversal), o número de varões e o espaçamento entre os mesmos, de algum modo semelhante ao que é pedido em Revit para um procedimento semelhante. A principal vantagem face à aplicação da *Autodesk* está, no entanto, no conjunto de opções disponíveis após a colocação das armaduras. Além das ferramentas comuns para a alteração de comprimentos e dos ganchos dos varões, estas permitem alterar a forma do grupo modelado e atribuir geometrias complexas ao desenvolvimento dos varões e estribos, entre outras ações disponíveis.

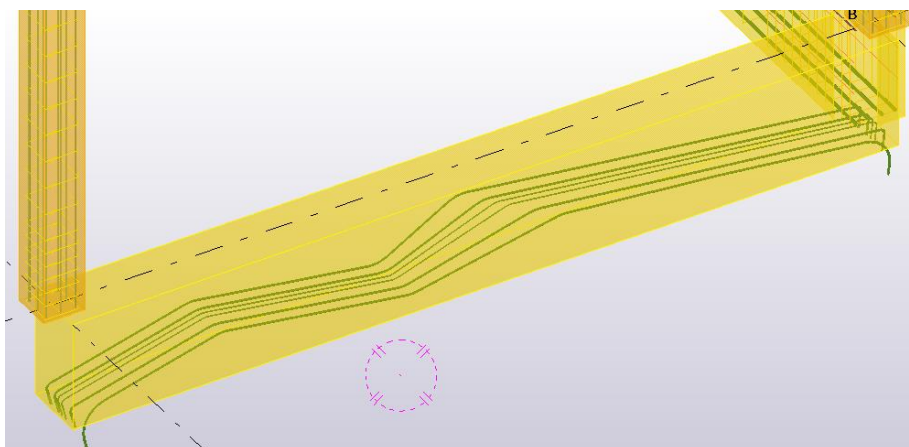


Figura 3.91 – Exemplo de armadura longitudinal personalizada

A introdução de elementos de armadura numa dada peça é feita através do menu *Betão* com a ferramenta *Armadura*. Estão disponíveis diversas opções, inclusive a de introdução de malhas e a de modelação de cordões de pré-esforço. Para aceder ao menu de um dado tipo de armaduras basta clicar em *Shift+RMB* (*Right Mouse Button*) sobre a opção desejada sendo apresentado um novo menu para definição das propriedades, como já tinha sido referido num dos parágrafos anteriores. Tendo um elemento do tipo viga ou pilar selecionado, basta definir todos os parâmetros necessários e de seguida aplicar. A aplicação não é feita de forma tão simples como no Revit, sendo necessário definir a forma das armaduras e de seguida a largura pela qual esta ficará distribuída, terminando com um clique sobre o botão central do rato para finalizar a ação e surgirem as armaduras modeladas na peça 3D.

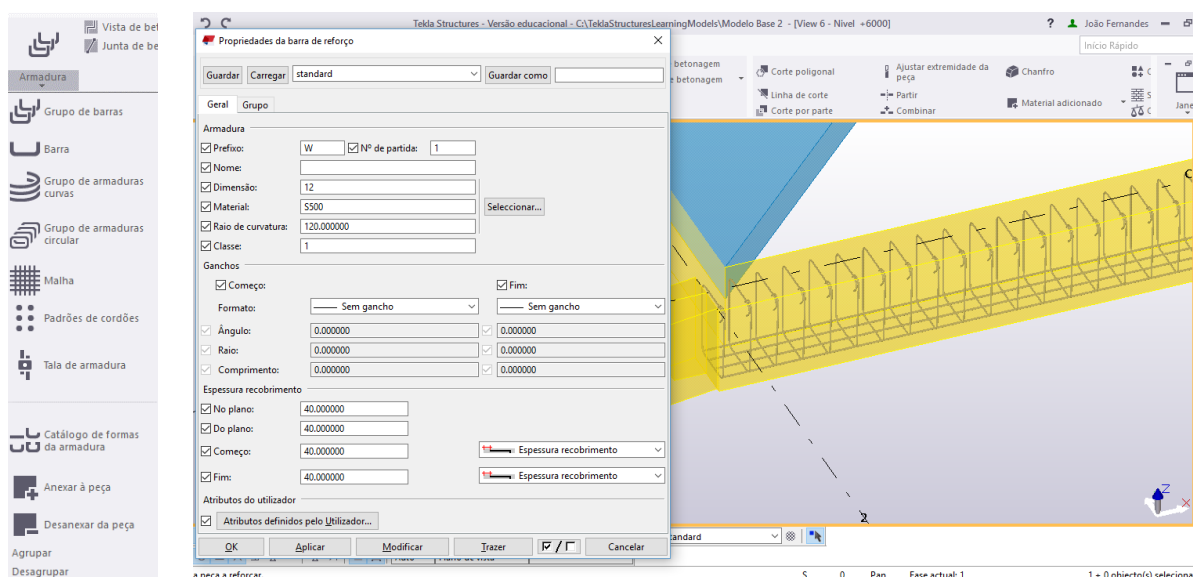
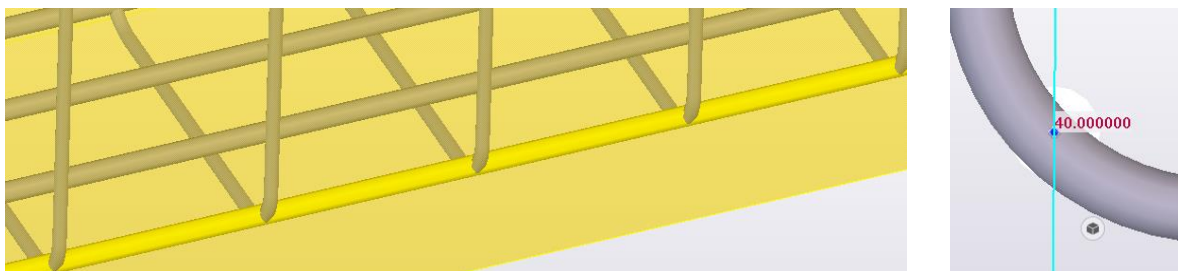


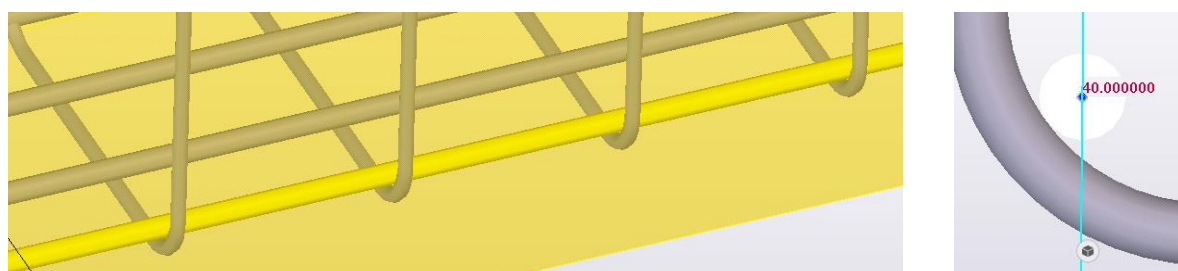
Figura 3.92 – Interface de modelação de armaduras em Tekla

A modelação manual em Tekla não está isenta de problemas. Para alcançar uma solução sem problemas ou conflitos pode ser necessário despendar mais tempo, uma vez que, por exemplo, em Tekla a posição de armaduras longitudinais, numa peça onde já tenham sido modelados estribos, não é automaticamente ajustada. O programa não assume a existência de outros elementos de armadura e sobrepondo-os sem

qualquer tipo de aviso. Cabe ao utilizador ter atenção a esses pormenores e recorrer a ferramentas para desagrupar as armaduras e proceder ao seu ajuste, elemento a elemento, até atingir a solução final.



a) Armadura inicialmente modelada



b) Armadura após aplicação de ajustes

Figura 3.93 – Exemplo de modelação de armaduras

Em lajes e paredes a modelação manual é feita de forma semelhantes ao Revit, mas o utilizador tem de definir logo à partida o número de varões e a distância entre os mesmos.

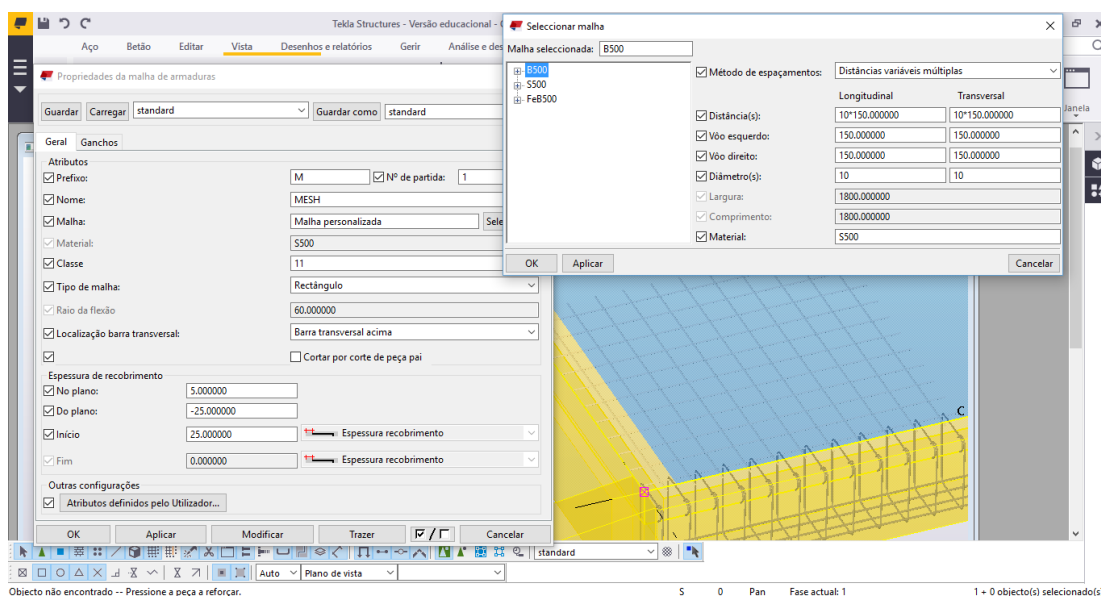


Figura 3.94 – Exemplo de modelação de malhas de armaduras

Caso a solução definida não seja suficiente para preencher a totalidade do painel, o modelo da malha ficará parecido com aquilo se pode observar na figura 3.94. Tem a desvantagem face ao Revit visto que cria a malha só para uma das faces, apesar de aparentar ser mais preciso nos alinhamentos dos varões

nas zonas de dispensa. Continua a ser necessário dividir as malhas por zonas para criar espaçamentos de largura variável dentro do mesmo painel.

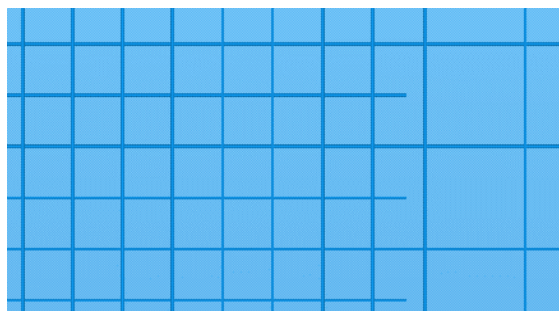
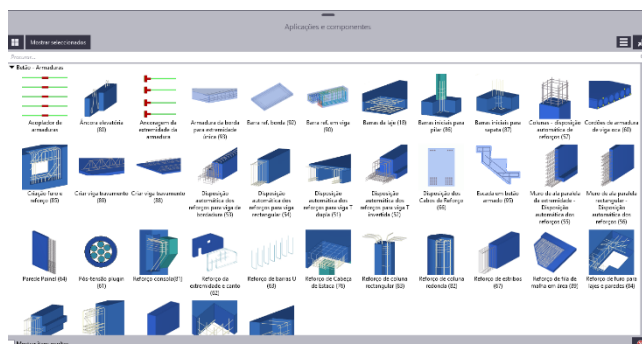


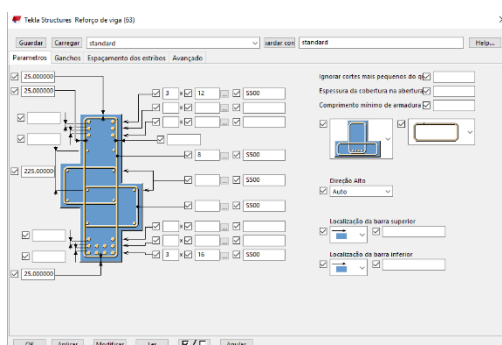
Figura 3.95 – Malha ortogonal com dispensa

A principal desvantagem face à modelação em Revit é a necessidade de ter de realizar ajustes em algumas peças, principalmente elementos viga ou pilar, o que acaba por quebrar o fluxo de trabalho.

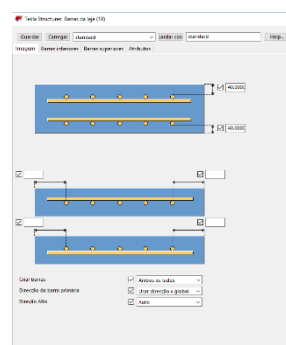
Para agilizar o processo de modelação, o Tekla disponibiliza um conjunto de extensões para modelação de armaduras em diversos tipos de elementos e para diferentes configurações de um dado tipo de objeto.



a) Menu de seleção de extensões



b) Vigas



c) Lajes

Figura 3.96 – Exemplo de extensões Tekla para modelação de armaduras

Cada extensão tem a sua abordagem à modelação, com diferentes parâmetros e opções de criação. Cabe ao utilizador escolher qual a mais adequada. O uso destas extensões obriga a um estudo prévio de cada uma, dadas as diferenças, por vezes significativas, entre a forma de aplicação de extensões aplicáveis ao

mesmo tipo de elementos. Estas também têm algumas limitações, seja ao nível de secções estruturais a que podem ser aplicadas, seja a nível de pormenores construtivos.

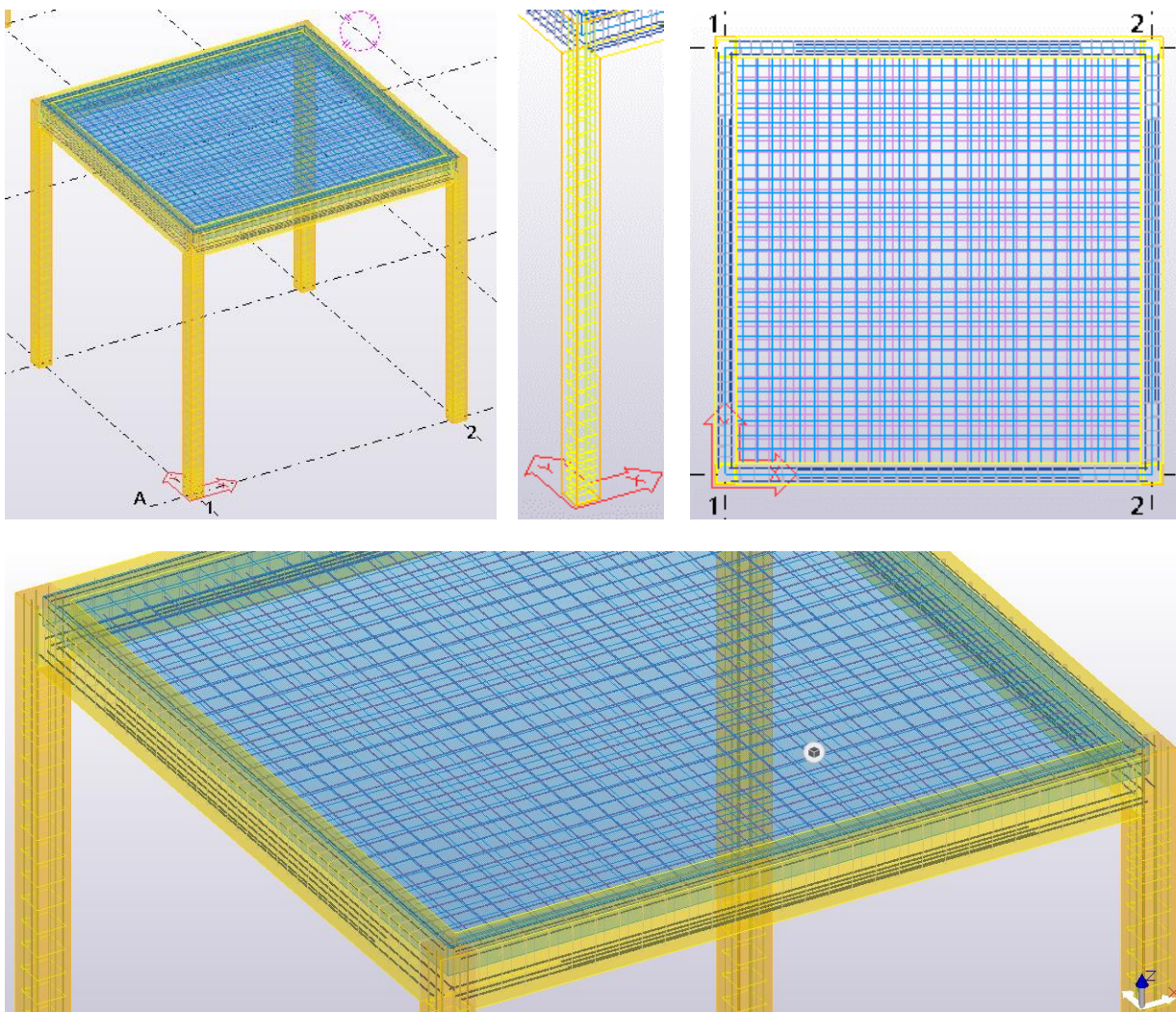
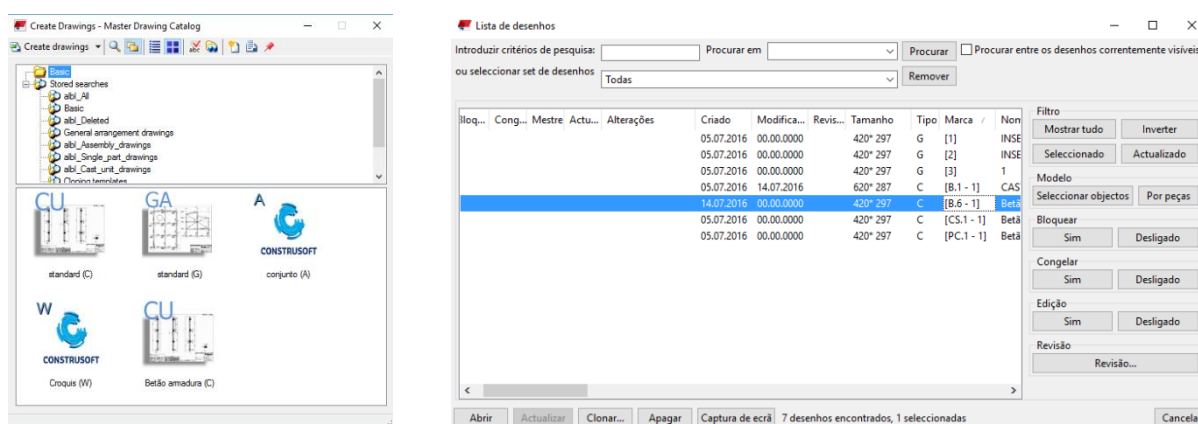


Figura 3.97 – Caso de estudo 1 modelado em Tekla

Tal como em Revit, as ferramentas não possuem uma solução para todos os casos possíveis, mas constituem uma ajuda na modelação e representação das armaduras num modelo tridimensional da construção e agilizam o processo de criação de desenhos técnicos e do processo de quantificação.

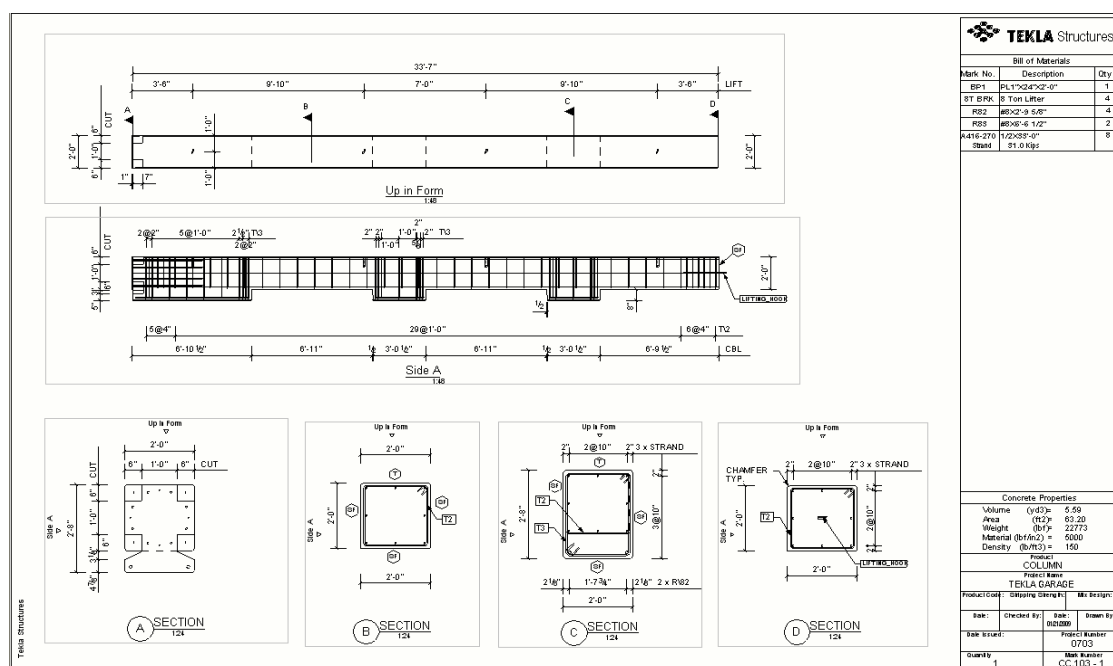
A produção de desenhos em Tekla será equiparável à produção em Robot ou Advance Concrete, com a criação de desenhos em Tekla a ser feita com base em *Templates* com definições para a criação de um desenho de um qualquer elemento construtivo. Na criação de um dado desenho são identificados e numerados os diversos elementos do modelo como soluções iguais e estes são agrupados, reduzindo o número de desenhos. Os desenhos criados também podem ser de elementos individuais ou de alçados, vistas em planta ou cortes. Cabe ao utilizador escolher o tipo de *template* que necessita para criar o desenho base da vista.

As opções variam entre desenho geral, unidade de molde e montagem. Na primeira são criados os desenhos globais de uma dada vista, na unidade de molde são criados os desenhos de pormenor construtivo e na última opção são criados desenhos de pormenor de montagem ou funcionamento conjunto de um grupo de peças. Se o utilizador estiver na dúvida sobre qual o *template* base que deve ser utilizado como referência na criação do desenho, basta aceder ao catálogo de desenhos e carregar para o modelo o que precisa.



a) Catálogo

b) Lista de desenhos



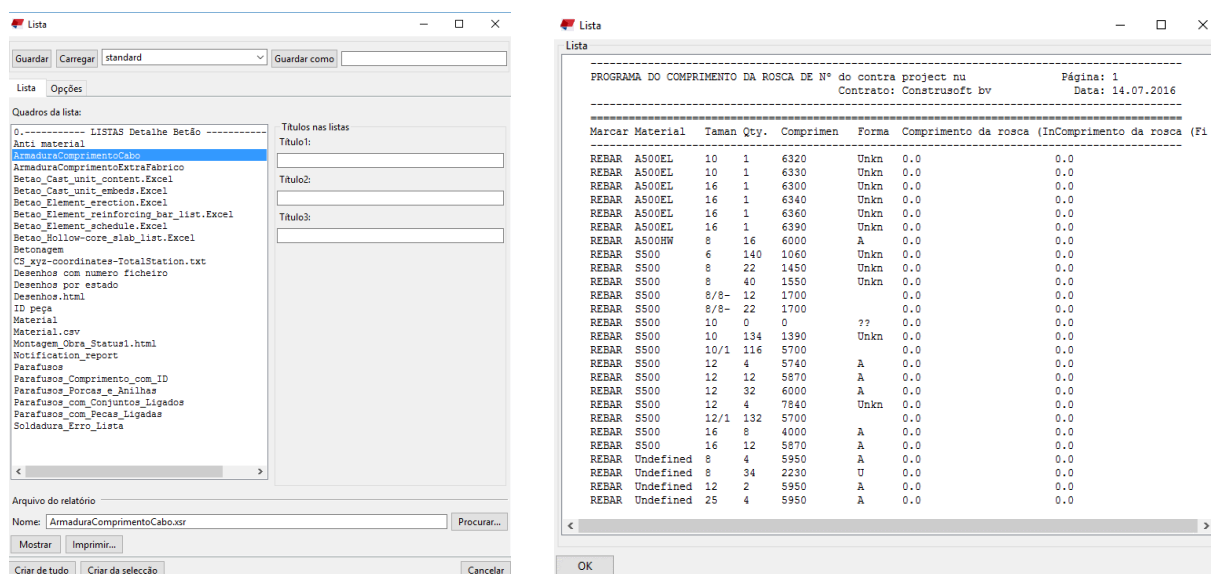
c) Exemplo de desenho de pormenor em pilares (Tekla Structures Support, 2015)

Figura 3.98 – Criação de desenhos em Tekla

Na figura 3.98 c) apresenta-se a representação de um desenho de pormenor de um pilar. A edição destes desenhos é feita na janela do próprio desenho e nela estão acessíveis ferramentas de anotação, introdução de vistas adicionais, alteração de parâmetros, como o peso da linha dos elementos de armadura ou da peça, cores, etc. Estes parâmetros podem ser gravados e utilizados em desenhos futuros.

A modificação do *template* pode ser morosa, mas após a conclusão da edição e gravação do mesmo, a produção dos seguintes desenhos é muito mais rápida. A exportação dos desenhos pode ser feita para formato .DWG ou .DXF, os formatos CAD mais habituais.

Relativamente à quantificação de materiais, esta pode ser feita de duas maneiras, a primeira em função de *templates* de texto, ou formato .CSV, acessíveis através da ferramenta *Relatórios* que se localiza no mesmo menu que as ferramentas de desenho. Estes relatórios podem ser relativos a levantamentos de material ou identificação de peças do modelo e permitem criar listas para um conjunto de peças seleccionadas ou para todos os objetos no modelo.

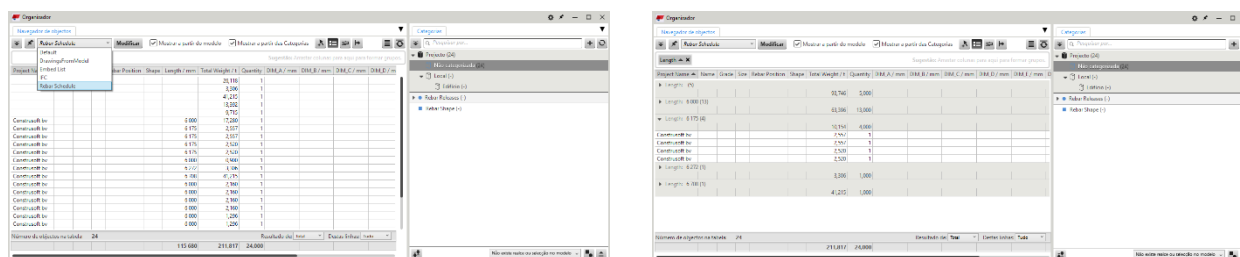


a) Menu inicial

b) Lista de quantidade de armaduras

Figura 3.99 – Criação de listas de materiais

A segunda opção intitula-se de *Organizador* e encontra-se no menu *Gerir*. Esta ferramenta sincroniza com o modelo e abre uma nova janela onde é possível explorar a lista de peças modeladas ou de armaduras e filtrar a informação de forma a organizá-la de forma mais intuitiva.



a) Navegador do Organizador

b) Navegador filtrado

Figura 3.100 – Organizador Tekla

A informação pode ainda ser exportada para um ficheiro do tipo .XLSX, que pode ser consultado num programa como o Ms-Excel, por exemplo.

Para finalizar com o teste ao *software*, resta verificar se a exportação do modelo para o formato .IFC é acessível de forma correta em Revit. Uma vez que foi feita a experiência inversa convém verificar se a passagem do modelo em IFC é feita com a mesma qualidade no sentido oposto.

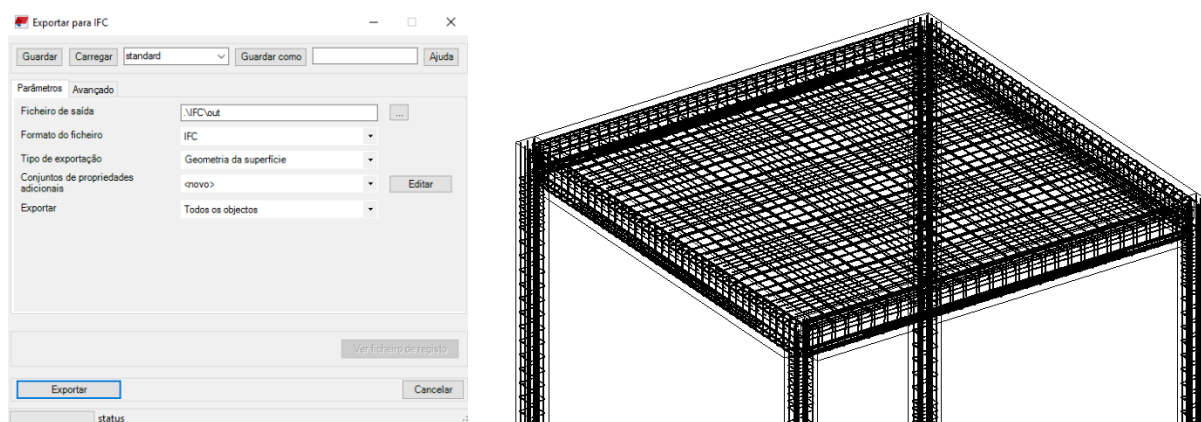


Figura 3.101 – Exportação de IFC a partir do Tekla

A exportação do Tekla permite exportar peças isoladas ou o modelo completo. A saída do modelo completo é tratada em bloco, seja em blocos parciais (Tekla BIMsight), ou bloco global (Revit). A passagem é feita de forma aparentemente perfeita, mas o conjunto de testes foi algo reduzido pelo que podem existir problemas que não foram identificados. Em Tekla BIMsight apesar de alguns elementos serem tratados em bloco, as armaduras podem ser tratadas por varão ou por conjunto, em função do tipo de armadura. Em Revit isso não é possível, o modelo pode ser usado para coordenação e visualização em conjunto com outros modelos, mas não é possível convertê-lo ou editá-lo como em Tekla.

Em conclusão, o Tekla Structures Learning 2016 é um programa com muitas e excelentes capacidades de modelação, quantificação e produção de desenhos, mas não tem a simplicidade de aplicação ou utilização de outras aplicações como o Revit por exemplo. Este pode ser um fator importante na altura da escolha do *software* de modelação porque apesar de ser um excelente programa, a facilidade e rapidez de utilização só acontece após uma experiência mais vasta com o mesmo, seja com a definição de todos os parâmetros e conhecimento de todas as ferramentas. Este não é um programa que seja tão eficiente ou atrativo numa primeira aproximação ao mesmo.

Neste relatório, dada a maior experiência em Revit aliada à geometria mais simples das peças presentes no caso de estudo 2, o Tekla Structures Learning não é a principal opção para modelação de armaduras, devido aos problemas de interoperabilidade como à necessidade de proceder a correções das geometrias e recriação de elementos no modelo que se encontra totalmente modelado em Revit (a introdução ao Tekla só aconteceu após a criação dos modelos do segundo caso de estudo). Uma vez que as ferramentas em Revit permitem uma modelação rápida de armaduras no modelo já existente este acabou por ter o favoritismo na altura da seleção do programa para modelação.

3.4 PROGRAMAÇÃO

Este ponto vai-se focar em dois tipos de programação e nas vantagens que o recurso a alguns programas e alguns tipos de linguagem podem ter para um engenheiro e para a área de projeto e/ou modelação.

A primeira linguagem é a *Visual Basic for Applications* (VBA) inserida no programa de cálculo Microsoft Excel. Esta aplicação é testada de forma isolada e como uma ligação ao *software* de análise e dimensionamento Robot Structural Analysis. São apresentadas algumas funções e utilidades que acabam por ser vantajosas para o dia-a-dia de um engenheiro/projetista.

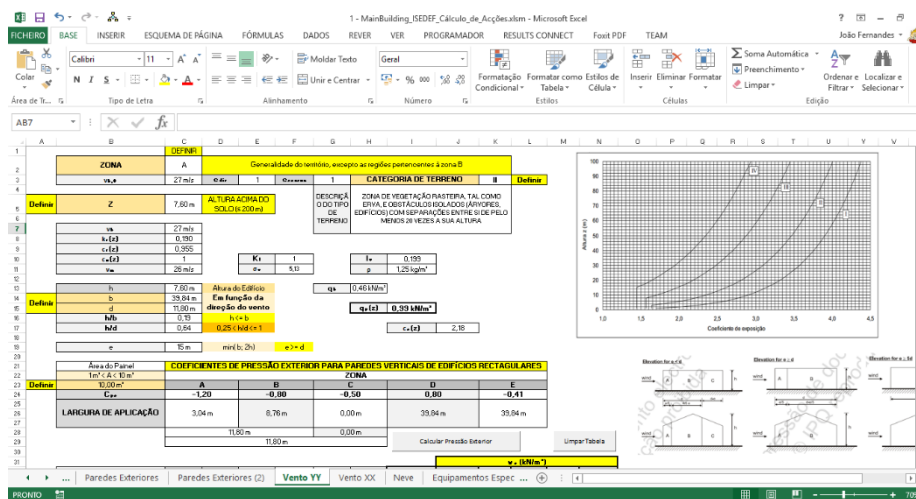


Figura 3.102 – Exemplo de folha de cálculo para determinação da pressão do vento segundo o EC1-4

A segunda é a linguagem de programação visual disponibilizada pelo programa Dynamo, *software* de suporte à metodologia BIM e que permite uma ligação direta ao Revit. O principal intuito do programa é o de permitir a um qualquer utilizador Revit programar algumas funções e/ou criar novas utilidades na aplicação da Autodesk para facilitar o processo de modelação.

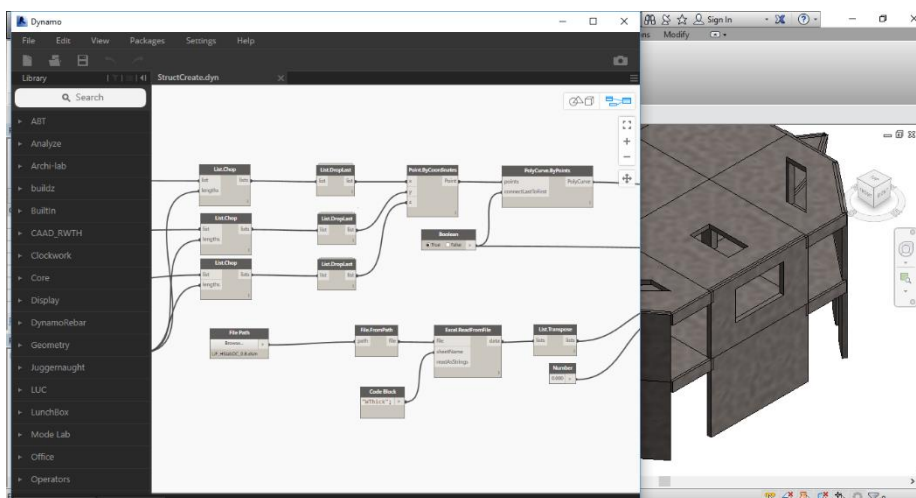


Figura 3.103 – Exemplo de aplicação do Dynamo na modelação de uma estrutura em Revit

3.4.1 MS-Excel com Visual Basic

Este programa permite organizar a informação e automatizar um conjunto de funções no interior das diversas folhas de cálculo. Para exemplificar a utilidade que pode ter em projetos de estruturas, são apresentadas de seguida duas folhas de cálculo criadas no desenvolvimento desta dissertação.

A primeira, mais simples, é uma folha que permite calcular ações associadas às restantes cargas permanentes, ao vento e sobrecargas estruturais deixando um registo organizado da informação que pode mais tarde ser arquivada com os restantes ficheiros e auxiliar na elaboração de uma memória descritiva do projeto.

Para desenvolver a folha de cálculo foi necessário arranjar uma lista que fornecesse um conjunto de dados relativos aos pesos específicos de diversos materiais utilizados na construção civil. A principal referência utilizada foi um documento disponível *online* com o título de “PESOS ESPECÍFICOS DE MATERIAIS” [53]. Para verificação dos valores apresentados também foram consultados o EC1-1 [54] e o ITE50 [55] para ajuste ou acréscimo de materiais não presentes na lista inicial.

Tabela 3.7 – Apresentação parcial da base de dados de materiais

| MATERIAL SOLTO | | kg/m ³ | kN/m ³ |
|----------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| AREIA | SECA | 1600 | 16 |
| | HÚMIDA | 2300 | 23 |
| | FINA SECA | 1500 | 15 |
| | GROSSA SECA | 1800 | 18 |
| ARGILA | SECA | 1800 | 18 |
| | HÚMIDA | 2100 | 21 |
| CAL | HIDRATADA | 1800 | 18 |
| | HIDRÁULICA | 700 | 7 |
| | EM PÓ | 1000 | 10 |
| | VIRGEM | 1600 | 16 |
| CIMENTO | A GRANEL | 1600 | 16 |
| | EM SACOS | 1500 | 15 |
| GESSO | EM PÓ | 1400 | 14 |
| | HIDRATADO (EM BLOCO) | 2600 | 26 |
| MINÉRIO | FERRO | 2800 | 28 |
| TERRA | COMPACTADA SECA | 1600 | 16 |
| | COMPACTADA HÚMIDA | 2000 | 20 |
| | ARENOSA | 1700 | 17 |
| | VEGETAL SECA | 1300 | 13 |
| | VEGETAL HÚMIDA | 1800 | 18 |
| | ENTULHO DE OBRAS | 1500 | 15 |

| REVESTIMENTOS, ISOLAMENTOS E BETÕES | | kg/m ³ | kN/m ³ |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| ARGAMASSA | CAL HIDRÁULICA | 2200 | 22 |
| | CIMENTO/CAL/AREIA | 1900 | 19 |
| | CIMENTO/AREIA | 2100 | 21 |
| | GESSO/ESTUQUE | 1400 | 14 |
| | CAL E AREIA | 1700 | 17 |
| BETÃO | CORRENTE | 2400 | 24 |
| | ARMADO | 2500 | 25 |
| | LEVE | 1300 | 13 |
| | CELULAR | 550 | 5,5 |
| | BETONILHA | 2000 | 20 |
| | LEVE C/ ARGILA EXPANDIDA | 1200 | 12 |
| ESTUQUE | ARGAMASSA DE CIMENTO | 2000 | 20 |
| | ARGAMASSA DE CAL | 1700 | 17 |
| | GESSO CARTONADO | 1000 | 10 |
| ISOLAMENTO | XPS | 40 | 0,4 |
| | EPS | 30 | 0,3 |
| | Lã DE ROCHA/VIDRO | 80 | 0,8 |
| | AGLOMERADO NEGRO DE CORTIÇA | 150 | 1,5 |

A lista total contém informação relativa a noventa e oito tipos de materiais distribuídos por sete categorias.

Para definição das ações de sobrecarga e de vento também foram criadas bases de dados. Os cálculos das ações do vento foram limitados para a tipologia construtiva de coberturas planas (terraço), com e sem bordos ou platibanda e para fachadas com paredes verticais de edifícios retangulares.

Ao longo da folha existem informações relativas a algumas das disposições regulamentares presentes nos Eurocódigos, sendo sempre aconselhável a consulta das normas referenciadas.

Tabela 3.8 – Tabelas de coeficientes de pressão exterior segundo o EC1-4

| ZONA | COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERIOR PARA PAREDES VERTICAIS DE EDIFÍCIOS RECTANGULARES | | | | | | | | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | A | | B | | C | | D | | E | |
| H/D | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 |
| 5 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | -0,5 | 0,8 | 1 | -0,7 | -0,7 |
| 1 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | -0,5 | 0,8 | 1 | -0,5 | -0,5 |
| ≤0,25 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | -0,5 | 0,7 | 1 | -0,3 | -0,3 |

| Tipo de cobertura | | ZONA | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | F | | G | | H | | I | |
| | | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 | Cpe,10 | Cpe,1 |
| BORDOS EM ARESTA VIVA | | -1,8 | -2,5 | -1,2 | -2,0 | -0,7 | -1,2 | 0,2 | -0,2 |
| C/PLATIBANDA (hp/h) | 0,025 | -1,6 | -2,2 | -1,1 | -1,8 | -0,7 | -1,2 | 0,2 | -0,2 |
| | 0,05 | -1,4 | -2,0 | -0,9 | -1,6 | -0,7 | -1,2 | 0,2 | -0,2 |
| | 0,1 | -1,2 | -1,8 | -0,8 | -1,4 | -0,7 | -1,2 | 0,2 | -0,2 |
| BORDOS ARREDONDADOS (r/h) | 0,05 | -1,0 | -1,5 | -1,2 | -1,8 | -0,4 | -0,4 | 0,2 | -0,2 |
| | 0,1 | -0,7 | -1,2 | -0,8 | -1,4 | -0,3 | -0,3 | 0,2 | -0,2 |
| | 0,2 | -0,5 | -0,8 | -0,5 | -0,8 | -0,3 | -0,3 | 0,2 | -0,2 |
| BORDOS AMANSARDADOS (α) | 30 | -1,0 | -1,5 | -1,0 | -1,5 | -0,3 | -0,3 | 0,2 | -0,2 |
| | 45 | -1,2 | -1,8 | -1,3 | -1,9 | -0,4 | -0,3 | 0,2 | -0,2 |
| | 60 | -1,3 | -1,9 | -1,3 | -1,9 | -0,5 | -0,5 | 0,2 | -0,2 |

Através de um conjunto de interpolações realizadas sem recurso a programação VBA é possível alcançar os resultados finais de pressão, seguindo sempre a linha de cálculo aconselhada na norma. A justificação para não recorrer sempre à programação em VBA justifica-se pela maior simplicidade de aplicação e maior facilidade de criação de determinada função nas tabelas. Por exemplo, numa situação onde seja importante manter uma atualização constante dos valores em análise o uso das ferramentas básicas é mais vantajoso porque retiram a necessidade de recorrer a ciclos de *autoupdate* que obrigam à escrita de linhas de código adicionais.

O recurso à linguagem VBA nesta folha foi mais simples porque é apenas necessário definir um conjunto de rotinas básicas com alguns ciclos e cálculos com desenvolvimento menos expressivo.

Tabela 3.9 – Rotinas básicas criadas em VBA para cálculo de cargas associadas a paredes exteriores

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>Private Sub CommandButton1_Click() Dim i As Integer i = 1 Do Until i = Cells(2, 3) + 1 Cells(5 + i, 2) = i i = i + 1 Loop End Sub</pre> | <pre>Private Sub CommandButton2_Click() Range("B6:E25").ClearContents Range("G6:H25").ClearContents End Sub</pre> |
| | <pre>Private Sub CommandButton4_Click() Dim i As Integer i = 1</pre> |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>Private Sub CommandButton3_Click() i = 0 Do Until i = Cells(2, 3) Cells(6 + i, 8) = Cells(6 + i, 6) * Cells(6 + i, 7) * 10 ^ -2 i = i + 1 Loop End Sub</pre> | <pre>Do Until i = Range("M5").Value + 1 Cells(7 + i, 15) = (Cells(7 + i, 11) * Cells(4, 9) - 0.75 * (Cells(7 + i, 12) * Cells(7 + i, 13) * Cells(7 + i, 14))) * Cells(4, 8) / Cells(7 + i, 11) i = i + 1 Loop End Sub</pre> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Parte do resultado final pode ser visto na figura 3.102, com a apresentação parcial da interface de cálculo das ações do vento, na figura 3.105 pode ser visto mais um exemplo da folha, agora com a apresentação da página relativa às cargas dos pavimentos interiores.

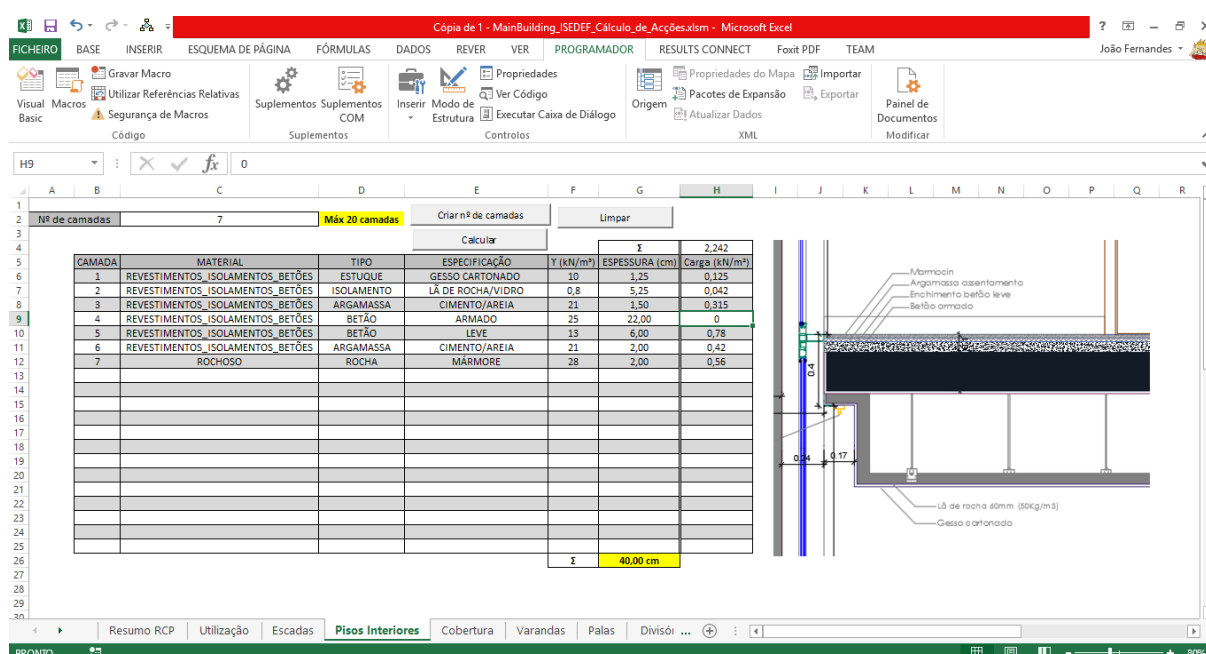


Figura 3.104 – Exemplo de determinação das restantes cargas permanentes em pisos interiores

Para terminar com o primeiro exemplo, fica o conselho de utilização da ferramenta *Validação de Dados* no menu *DADOS* que permite organizar a informação em listas de forma bastante eficiente e a correspondência de dados e facilidade de criação é bastante mais simples de aplicar do que se fosse feita uma rotina VBA para definição da mesma lista.

A apresentação dos diversos elementos desta folha de cálculo é exposta no Anexo I sobre o caso de estudo 2 sendo estes elementos usados para justificação das cargas consideradas no modelo de cálculo.

O segundo exemplo possui um desenvolvimento mais complexo e tem como principal função criar a ligação entre os dados de modelação em Robot Structural Analysis e o Revit por intermédio da aplicação que é descrita no ponto seguinte, o Dynamo.

Além dessa conexão, a folha é utilizada para dimensionamento de elementos em betão armado, lajes homogêneas maciças, vigas e pilares com secção retangular/quadrada simples. Para as lajes, o

desenvolvimento dos procedimentos de cálculo abordou tanto os Estados Limite Últimos como os Estados Limite de Serviço (sem desenvolver alguns parâmetros, por exemplo, o cálculo da deformação a longo e curto prazo), sendo que para os restantes elementos só é feito o dimensionamento para os Estados limite Últimos. A justificação para essas limitações deve-se ao tempo limitado que existe para o desenvolvimento deste tipo de dissertação e da necessidade de criação deste tipo de ferramenta somente para apoio na ligação ao Dynamo. Já foi referido que o *software* de análise testado tem capacidade para realizar um dimensionamento com bastante facilidade e com a totalidade, ou quase totalidade, de parâmetros regulamentares exigidos, mas a importação dos dados de armaduras pela API não foi alcançada. Por essa razão decidiu-se criar algo mais exemplificativo e capaz de demonstrar tanto as funcionalidades do programa como garantir que é possível atingir os objetivos definidos.

Em Excel é possível criar uma ligação com o programa Robot de duas formas: utilizando a linguagem VBA para receber ou transmitir informações, ou através de um suplemento com o nome *Results Connect* que é instalado no ato da instalação do *software* da Autodesk, suplemento este que tem a limitação de só permitir importar dados.

Percebe-se que exista uma certa vantagem em utilizar a API (*Application Programming Interface*) do Robot para Excel para obter/transmitir informações entre as duas aplicações, mas nem por isso o suplemento deixa de ser uma ferramenta interessante. O uso de cada abordagem tem as suas vantagens e por isso ambas as ferramentas foram usadas no desenvolvimento desta folha de cálculo.

O API do Robot é um conjunto de comandos VBA que só ficam disponíveis a partir do momento em que na interface VBA, através do menu *Ferramentas*, são autorizadas as *Referências* respeitantes ao Robot Object Model.

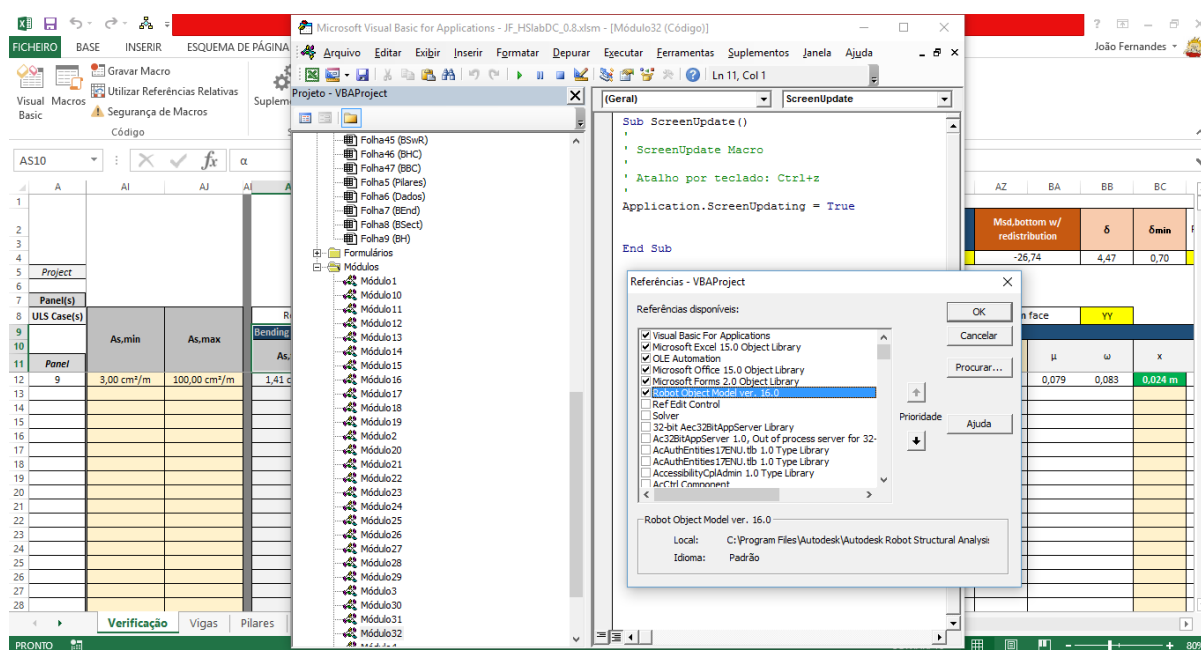


Figura 3.105 – Janela para habilitação de referências para um projeto VBA

Para quem estiver a dar os primeiros passos neste tipo de programação a *Autodesk* tem um fórum *online* onde é possível encontrar tutoriais e folhas com código desenvolvido para diversos tipos de funções, importação de esforços, definição de geometrias ou combinações de carga, entre outras (<http://forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis/useful-addins-for-robot-api/td-p/3899448>).

No desenvolvimento apresentado foi utilizado e adaptado parte do código de duas dessas aplicações, ambas desenvolvidas por Rafal Gaweda, técnico de suporte da *Autodesk* [56]. Só parte do código foi utilizado porque existiam funções do código que não eram as mais indicadas para os objetivos definidos e porque em alguns casos certas linhas de código podem ser utilizadas para diferentes fins.

Os principais usos para este tipo de ligação na folha em causa devem-se à necessidade de importação de alguns dados relativos a coordenadas dos diversos elementos selecionados e aos materiais e outras características dos elementos importados. Os esforços foram importados recorrendo ao *Results Connect* e a macros para automatização do processo de importação fazendo a ligação com os dados importados por API para agilizar o processo.

Se utilizarmos a API o que acontece é que o programa vai listar todos os esforços de um dado objeto para todas as combinações, algo que além de ter o risco de tornar o processo de importação mais longo, também torna a lista de dados para análise maior. Com a opção utilizada reduz-se substancialmente o conjunto de dados na folha e a velocidade de importação acaba por ser superior. Existe ainda a opção *Query* na API que nos carrega todos dados de forma relativamente rápida, mas no caso dos painéis perde-se a informação dos nós que possuem esses esforços e torna-se impossível mapeá-los.

Convém referir que a importação de dados é feita em função dos objetos selecionados, se se quiser a informação de um painel ou de um elemento barra basta seleccioná-lo em Robot, abrir a folha de cálculo e na página dedicada ao tipo de elemento selecionado clicar no botão de importação de dados. Se não existir um objeto selecionado em Robot, a folha de cálculo produz um aviso solicitando a sua seleção.

No exemplo da tabela 3.10 é possível ver parte do código descrito, com uma função adicional.

Tabela 3.10 – Exposição parcial do código para importação de dados de painéis (*Rafa Gaweda*)

```
Public RobApp As RobotApplication
Public Sub CommandButton1_Click()
    Set RobApp = New RobotApplication
    If Not RobApp.Visible Then
        Set RobApp = Nothing
        MsgBox "Open Robot and load Model", vbOKOnly, "ERROR"
        Exit Sub
    Else
        RobApp.Interactive = False
    End If
End Sub
```

```

Cells(5, 2) = RobApp.Project.Name
starttime = Now
Dim RSelection As RobotSelection
Set RSelection = RobApp.Project.Structure.Selections.Get(I_OT_PANEL)
Dim PanelCol As RobotObjObjectCollection
Set PanelCol = RobApp.Project.Structure.Objects.GetMany(RSelection)
If (PanelCol.count = 0) Then
    MsgBox "Select panel(s) in Robot", vbOKOnly, "ERROR"
    RobApp.Interactive = True
    Exit Sub
End If
Cells(7, 2) = RSelection.ToText
Set RSelection = RobApp.Project.Structure.Selections.Get(I_OT_CASE)
Dim RCaseCol As RobotCaseCollection
Set RCaseCol = RobApp.Project.Structure.Cases.GetMany(RSelection)
If (RCaseCol.count = 0) Then
    MsgBox "Select case(s),combination(s) in Robot", vbOKOnly, "ERROR"
    RobApp.Interactive = True
    Exit Sub
End If
For i = 1 To RCaseCol.count
    RCaseCol.Get (i)
Next i
If Not RobApp.Project.Structure.Results.Available Then
    If (MsgBox("No results, do you want to start calculations?", vbYesNo, "WARNING") = vbYes) Then
        RobApp.Project.CalcEngine.Calculate
    Else
        RobApp.Interactive = True
    End If
End If

```

Tabela 3.11 – Exemplos parciais de código VBA para dimensionamento de lajes

| a) Importação de Dados de painéis |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> If Cells(13, 1) = "" Then Cells(12, 4).FormulaR1C1 = "=RSA_PANEL_DATA("""MATERIAL""",RC[-3])" Cells(12, 4).Copy Cells(12, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, _ Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False Application.CutCopyMode = False Cells(12, 5).FormulaR1C1 = _ "=RSA_PANEL_DATA("""NODES""",RC[-4])" Cells(12, 5).Copy Cells(12, 5).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, _ Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False </pre> |

```
Application.CutCopyMode = False
Cells(12, 6).FormulaR1C1 = _
"=RSA_PANEL_FORCE_DATA("'"&EXTREMUM&"',"COMPLEX_MXX_TOP_WA'"&,"MAX'"&,"SMTH_PANEL'"&,"PANELS'"&,"RC1,R8C2,1,0,0)"
Cells(12, 6).Copy
```

b) *Autoupdate* em função da interseção de um grupo de células

```
Set KeyCells = Range("BX12:BY250")

If Not Application.Intersect(KeyCells, Range(Target.Address)) _

    Is Nothing Then

    Application.Run "Macro5"

    Application.Run "LimVerXXtop"

    Application.Run "LimVerXXbottom"

    Application.Run "LimVerYYtop"

    Application.Run "LimVerYYbottom"

End If
```

c) Parte da rotina para cálculo de dados ELU

```
Cells(12, 1).Select

count = Range(Selection, Selection.End(xlDown)).count - 1

Range("X8:X9").FormulaR1C1 = "=R[4]C[-2]/Dados!R[24]C[-15]"

If Cells(13, 1) = "" Then

'fcd,fyd,d de cálculo e extensão do aço

Cells(12, 20).FormulaR1C1 = "=RC[-17]*10^-3-0.04"

Cells(12, 21).FormulaR1C1 = _

    "=INDEX(Dados!R3C2:R3C15,1,MATCH(Verificação!RC[-17],Dados!R2C2:R2C15,0))/Dados!R18C2"

Cells(12, 22).FormulaR1C1 = _

    "=INDEX(Dados!R32C5:R37C5,MATCH(Verificação!R5C22,Steel,0),1)/Dados!R19C2"

'ciclo MYYtop < 1 e MYYbot < 1

If Cells(12, 10) < 1 And Cells(12, 12) > -1 Then

'ciclo MXXtop < 1

If Cells(12, 6) < 1 Then

'ULSbotXX

Cells(12, 26).FormulaR1C1 = _

    "=MIN(IF(((--RC[-6]+SQRT((RC[-6])^2-4*-1*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))*--RC[-18])/((RC[-5]*1000*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))>0),(--RC[-6]+SQRT((RC[-6])^2-4*-1*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))*--RC[-18])/((RC[-5]*1000*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))),100),IF(((--RC[-6]-SQRT((RC[-6])^2-4*-1*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))*--RC[-18])/((RC[-5]*1000*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))))/((-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))))>0),(--RC[-6]-SQRT((RC[-6])^2-4*-1*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))*--RC[-18])/((RC[-5]*1000*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))))/((-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))))>0),1),1))"
```

```

"=MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))>0),(-RC[-6]-SQRT((RC[-6])^2-4*-1*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))*-RC[-18]/(RC[-5]*1000*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0)))/(-2*INDEX(Dados!R13C2:R13C15,1,MATCH(Verificação!RC[-22],Dados!R2C2:R2C15,0))),100))"

Cells(12, 27).FormulaR1C1 = _

"=INDEX(Dados!R7C2:R7C15,1,MATCH(Verificação!RC[-23],Dados!R2C2:R2C15,0))*(RC[-7]-RC[-1])/RC[-1]"

Cells(12, 28).FormulaR1C1 = _

"=RC[-7]*INDEX(Dados!R12C2:R12C15,1,MATCH(Verificação!RC[-24],Dados!R2C2:R2C15,0))*RC[-2]/RC[-6]*10^4"

'As,min

Cells(12, 35).FormulaR1C1 = _

"=IF(0.26*(INDEX(Dados!R9C2:R9C15,1,MATCH(Verificação!RC[-31],Dados!R2C2:R2C15,0)))/INDEX(Dados!R32C5:R37C5,MATCH(Verificação!R5C22,Steel,0),1)*1*RC[-15]*10^4>0.0013*1*RC[-15]*10^4,0.26*(INDEX(Dados!R9C2:R9C15,1,MATCH(Verificação!RC[-31],Dados!R2C2:R2C15,0)))/INDEX(Dados!R32C5:R37C5,MATCH(Verificação!R5C22,Steel,0),1)*1*RC[-15]*10^4,0.0013*1*RC[-15]*10^4)"

'As,max

Cells(12, 36).FormulaR1C1 = "=0.04*RC[-33]/1000*10^4"

```

Muitas das funções utilizadas foram criadas recorrendo a macros. O uso de macros facilita o processo e permite que ao ser iniciado o cálculo, as células se mantenham atualizadas e com a função disponível para consulta rápida, dando ainda liberdade ao utilizador para alterar pontualmente algum dos procedimentos sem que isso implique uma alteração do código registado em VBA. Também permite que o *autoupdate* seja apenas necessário para verificações mais visuais com a atribuição de formatações específicas de células que se alteram em função dos resultados. Cabe ao utilizador definir qual a melhor solução para o seu projeto.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|-----------------|--|--|--|------------------------|--|-----------------------------|--|---|--|----------|--|---------|--|-----------------|--|-----------------------------------|--|-------------------|--|
| | | | | | | Dynamo Data Clean | | | | | | | | SLS CHR | | Case no. 8 9 | | SLS QPR | | Case no. 11 12 | |
| Project | | ModeloBase1.rtd | | | | | | Stress Control Option | | | | | | | | | | | | | |
| Panel(s) | | 9 | | | | Import Selected Panels | | Force Cracked Hypothesis | | Y | | (Y or N) | | | | | | SLS CHR & QPR Case(s) de finit on | | | |
| ULS Case(s) | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

a) Lajes

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------|--|---------------|---------------|--------------|------------|-------------|------------|-----------|--------|--------|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|--|
| Project | ModeloBase1.rtd | | Section Info | | | | | My (kN.m) | | | d,calc | | | fcd | fyd | | |
| Beam(s) | 5 14 | | Beam | Material | Ref. | Lenght (m) | Height (mm) | Base (mm) | Gamma (°) | d1 | c | d2 | d,calc | fcd | fyd | | |
| ULS Case(s) | 4 | | S | C20/25 | B R30x50 (1) | 6 | 500 | 300 | 0 | -24,67 | 95,69 | -24,67 | 0,45 m | 13,33 MPa | 347,83 MP | | |
| CHR Case(s) | 8 9 | | | | | | | Fz (kN) | | | | | | | | | |
| QPR Case(s) | 11 12 | | Lifetime | 15 to 30 (S3) | Welded Reinf | N | dg 15 mm | | d1 | | | c | d2 | | | | |
| Beam Data | | | Environment | XC2/XC3 | Bond Cond. | A | | | | 87,98 | | | 87,98 | -87,98 | | | |
| Number | 5 14 | | Steel | A400 NR SD | Eyd (%) | 1,74 % | | | | | | | | | | | |
| Name | Vigas_5 Vigas_14 | | Cnom | 30 mm | | | | | | | | | | | | | |
| Start Node | 8 977 | | As,calc (ULS) | | | As,min | As,max | Position | | n | | e | Additional | As | d | d.live | |
| X | 6000 6000 | | d1 | c | d2 | 1,60 cm²/m | 6,54 cm²/m | 1,60 cm²/m | Bend.Top | d1 | 3 | 12 | c | 5,65 cm² | 0,458 m | 42,00 mm | |
| Y | 0 12000 | | 1,60 cm²/m | x,top | x,top | 1,93 cm² | 60,00 cm² | c | | c | 2 | 12 | / | 2,26 cm² | 0,456 m | 200,00 mm | |
| Z | 6000 6000 | | 0,017 m | 0,070 m | 0,017 m | | | d2 | | d2 | 3 | 12 | c | 5,65 cm² | 0,454 m | 40,00 mm | |
| End Node | 6 975 | | Es (%) | Es (%) | Es (%) | | | Base | | Base | 2 | 12 | / | 2,26 cm² | 0,454 m | 200,00 mm | |
| X | 6000 6000 | | 88,04 % | 18,93 % | 88,04 % | | | Reinf. | | Reinf. | 4 | 12 | Base | 6,78 cm² | 0,456 m | 30,40 mm | |
| Y | 6000 18000 | | Bend.Top | | Bend.Bottom | | Vrd | | Pos. | | e | // | Branches n° | As | | | |
| Z | 6000 6000 | | d1 | | d2 | | d1 | | d1 | 6 | 30 | 2 | 1,88 cm² | | | | |
| Material | C20/25 C20/25 | | 6000 17000 | | 3500 | | 3 | | c | 8 | 12,5 | 3 | 12,06 cm² | | | | |
| Section | B R30x50 (1) B R30x50 (1) | | 5000 15000 | | 0 | | 8 | | d2 | 10 | 17,5 | 4 | 17,96 cm² | | | | |
| Lenght | 6000 6000 | | 6000 17000 | | 3500 | | 10 | | | | | | | | | | |

b) Vigas

| 11 | Panel | Reference | Thickness | Material | 13000 | 9000 | 3500 |
|----|-------|-----------|-----------|----------|-------|-------|------|
| 12 | 20 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 13000 | 4000 | 3500 |
| 13 | 25 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 13000 | 4000 | 0 |
| 14 | 26 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 13000 | 9000 | 0 |
| 15 | 27 | TH20 | 200 mm | C25/30 | a | a | a |
| 16 | 28 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 6000 | 17000 | 3500 |
| 17 | 29 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 5000 | 15000 | 0 |
| 18 | 30 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 4600 | 15000 | 1750 |
| 19 | 31 | TH20 | 200 mm | C25/30 | a | a | a |
| 20 | 32 | TH20 | 200 mm | C25/30 | 6000 | 15500 | 0 |
| | | | | | 5000 | 15000 | 0 |
| | | | | | 6000 | 17000 | 3500 |
| | | | | | a | a | a |

c) Paredes

Figura 3.106 – Apresentação do layout de algumas das páginas da folha de cálculo

Uma opção que existe para melhorar o visual final da folha e até disfarçá-la de aplicação independente é o recurso ao *userform*. Esta opção permite criar uma interface interna ao Excel que pode apresentar e correr todos os comandos e informações, com limitação ao nível da apresentação da formatação das células. É necessário definir regras próprias para formatações condicionais. Isto permite ao utilizador distribuir melhor a informação sem necessitar de recorrer a várias páginas.

JF-HSlabDC 1.0

Import Data from RSA

Panel: 9

Cases: ULS: 4, SLS CHR: 8 9, SLS QPR: 11 12

Proprieties definition

Lifetime: 15 to 30 (S3), Environment: XC2/XC3, Steel: A400 NR SD, Concrete: C20/25, Thickness: 250 mm

Reinforcement

Bond Condition: A, Welded: N

Reinforcement closest to Slab face

Top: YY, Bottom: YY

Calculate **Refresh**

Requirements **Design/Check** **ExcelWb**

Refresh **Save**

XX

| | Diameter | // | As | d | Msd | Mrd | Mrd/Msd |
|--------|----------|------|----------------------|---------|--------|---------|---------|
| Top | 6 | 20 | 1,41 cm ² | 0,211 m | 9,46 | 10,255 | 1,08403 |
| Bottom | 12 | 17,5 | 6,46 cm ² | 0,202 m | -43,16 | -43,443 | 1,00659 |

YY

| | Diameter | // | As | d | Msd | Mrd | Mrd/Msd |
|--------|----------|------|----------------------|---------|--------|---------|---------|
| Top | 6 | 20 | 1,41 cm ² | 0,217 m | 9,46 | 10,550 | 1,11522 |
| Bottom | 12 | 17,5 | 6,46 cm ² | 0,214 m | -43,16 | -46,139 | 1,06913 |

Figura 3.107 – Exemplo e *userform* criado para o dimensionamento de lajes

Para finalizar sobre o Excel, fica o conselho de utilizar o comando *Application.ScreenUpdating*, o uso deste comando permite que o Excel corra todas as rotinas até ao fim e só depois atualize a folha de cálculo para apresentar os resultados. Isto é uma ferramenta que agiliza o cálculo e numa folha que seja muito pesada é uma boa opção para acelerar os processos. Para compreender melhor alguns dos conceitos e comandos aqui abordados fica o conselho de pesquisar nos fóruns dedicados à programação em Excel como o *MrExcel*, o *Stackoverflow*, ou a página de suporte da *Microsoft*. Não é possível abordar todos os pontos e rotinas aplicadas dada a quantidade de informação e o real objetivo desta dissertação. O recurso a estas ferramentas é fulcral, mas o destaque permanece nos resultados de modelação alcançados.

Results Connect - Formula wizard

Robot Structural Analysis

- Project
 - Number of labels
- Results
 - Bars
 - Bar displacements - data
 - Bar displacements - values
 - Bar forces - data**
 - Bar forces - values
 - Bar stresses - data
 - Bar stresses - values
 - Nodes
 - Node displacements - data
 - Node displacements - values
 - Support reactions - values
 - Panels
 - Panel displacement - data
 - Panel forces - data
 - Panel stresses - data
 - Selection
 - Array of selected objects
 - List of selected objects
 - Number of selected objects
 - Number of the object from the selection
 - Structure
 - Bars
 - Section data
 - Loads
 - Load data
 - Load record type

Bar forces - data

RSA_BAR_FORCE_DATA

Information type

Force type: "FX"

Extremum type: "MAX"

Bar no.: "ALL"

Case no.: "ALL"

Division points no.: 21

Preview: RSA_BAR_FORCE_DATA("BAR_NO";"FX";"MAX";"ALL";21)

Information type

Types of information: bar number, case component number, case number, extremum value (text - defined as an argument in the formula and enclosed in quotation marks, cell address - identifies the cell data will be loaded from).

Returns information concerning values of forces in structure bars.

Used units: Force [kN], Moment [kN*m]

Show formulas **Help for this formula** **Insert (AMT)** **Cancel**

Figura 3.108 – *Formula wizard* do *Results Connect*

3.4.2 Dynamo

O Dynamo, como já foi dito, é uma aplicação que permite criar rotinas e programar de uma forma visual. Quer-se com isto dizer que em vez de se proceder à escrita de dezenas de linhas de código a programação é feita recorrendo a nós (*Nodes*) de texto com funções pré-definidas ou personalizáveis ligados entre si até atingir o objetivo previamente definido. Ver figura 3.103 para ver um exemplo de ligação entre nós.

A utilização deste tipo de programação é bastante útil e permite criar inúmeras utilidades para o Revit.

Nesta dissertação a finalidade dada ao Dynamo foi a de criar um modelo estrutural em Revit a partir de um modelo já criado em Robot Structural Analysis sem recorrer às ferramentas de integração direta. Esta programação permite reduzir alguns dos problemas de interoperabilidade entre os dois programas. Ao contrário do que acontece com a integração direta, não permite um fluxo de trabalho com duplo sentido. Este funciona apenas para o sentido Robot-Revit, e como já foi referido no ponto anterior, ainda tem uma aplicação intermediária para tratamento da informação.

O Dynamo analisa informação em função de listas e tem um nó próprio para fazer a importação de dados a partir de folhas Excel. É sempre possível definir uma lista em Dynamo ou existindo uma aplicação específica para um dado objeto podemos simplesmente utilizar um nó para seleccionar esse elemento.

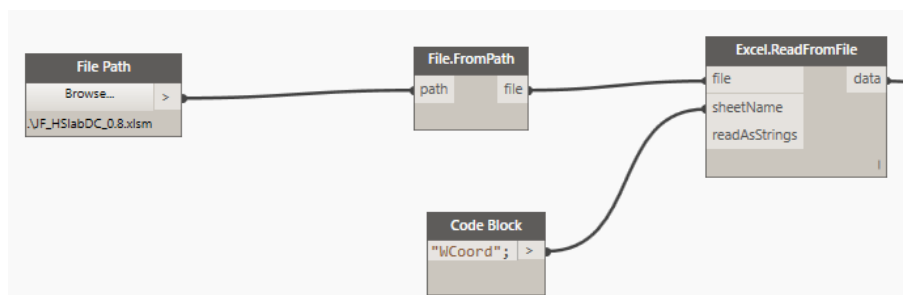


Figura 3.109 – Nós necessários para importar informação do Excel

Após a importação dessas listas é necessário passar por uma fase de tratamento de dados. Neste caso é utilizado como principal exemplo o processo de divisão das listas relativas às coordenadas de uma lista de paredes criadas em Robot.

Na figura 3.106 c) apresenta-se parte da página que contém as coordenadas listadas para cada parede. Existe uma linha com a letra “a” que serve para indicar a separação entre cada parede, ou seja, cada conjunto de coordenadas entre linhas identificadas com a letra “a” corresponde a uma parede. A primeira coluna corresponde à coordenada x, a segunda à y e a última à z de um dado ponto da parede.

O Dynamo só consegue criar pontos e as respetivas linhas entre pontos se analisar a informação coluna a coluna. É então feita uma divisão dessas mesmas colunas desconstruindo a informação e atribuindo um rácio para dividir a lista total em listas que contenham a informação individual de cada painel. A definição do rácio é feita com programação em VBA.

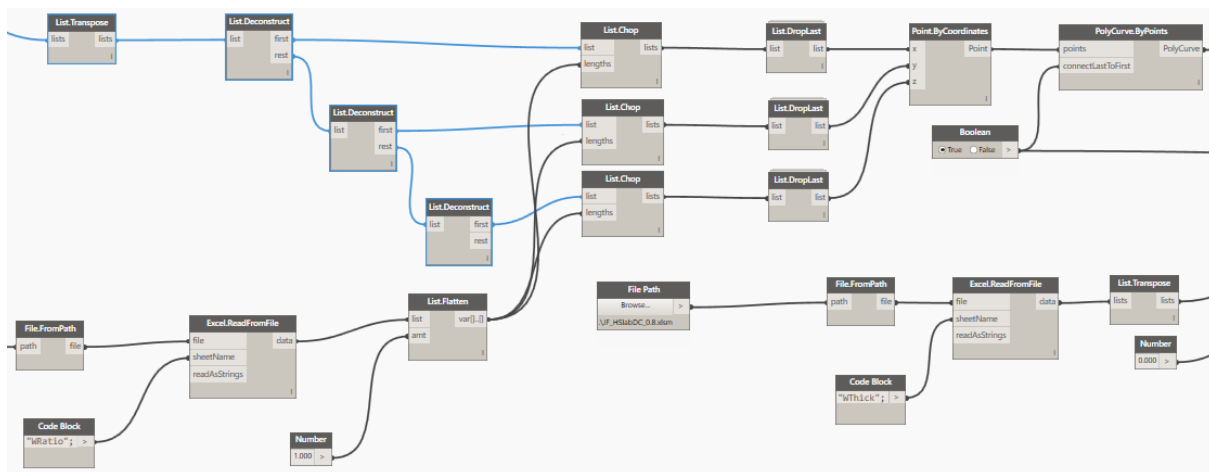


Figura 3.110 – Nós utilizados para criação de paredes em Dynamo (Continuação da Figura 3.109)

Após o tratamento de dados basta ligar os nós com as coordenadas ao nó *PolyCurve.ByPoints* ligar ao *Surface.ByPatch* para se conseguir criar uma superfície. Aplicar a espessura ao elemento também é feito através de um nó específico, mas o que realmente importa é falar da criação do elemento em si. Se se pretender criar uma parede regular em Revit, ou qualquer outro elemento de caráter estrutural, é necessário definir, além da posição, o tipo de elemento, o material e o nível, podendo ser pedidas outras informações em função do elemento construtivo a modelar.

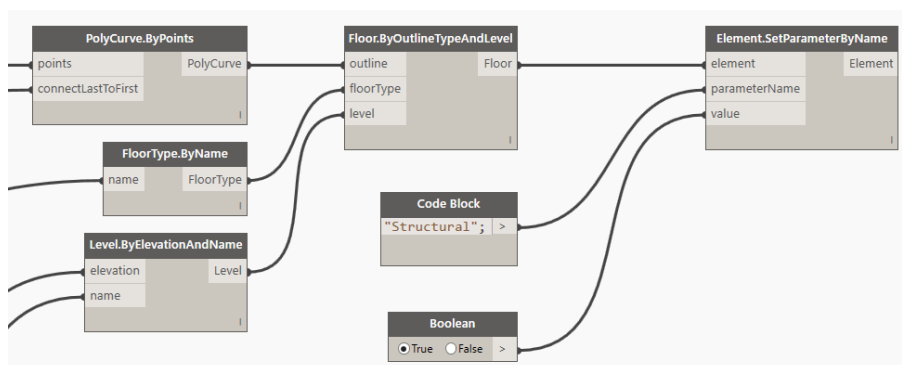


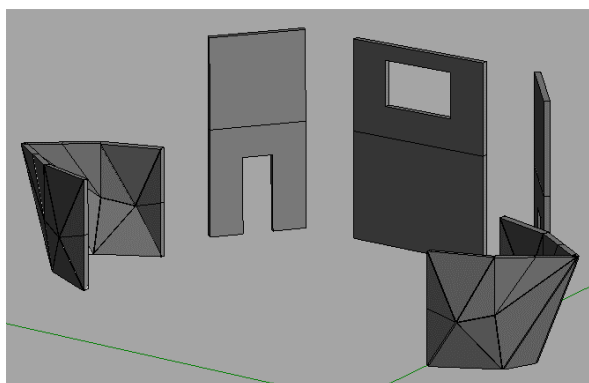
Figura 3.111 – Modelação de uma laje estrutural em Revit pelo Dynamo

Como seria de esperar também existem algumas limitações na modelação em Revit a partir do Dynamo. Em vigas e pilares a modelação é possível, desde que o material e a família de viga ou pilar tenha sido criada e carregada em Revit, não ficando a criação destes elementos limitada por nenhuma condição geométrica. Em lajes e paredes isso já não se verifica, porque, por exemplo, não é possível criar lajes inclinadas. Ainda que o Dynamo defina o esboço da laje com toda informação relacionada, o Revit não vai criar o objeto. Em paredes existe uma situação semelhante só que nas lajes é necessário utilizar um plano horizontal e em paredes o elemento tem que ser criado num plano vertical ortogonal ao plano XY, não interessando a orientação desde que seja vertical com um ângulo de 90° com o plano horizontal.

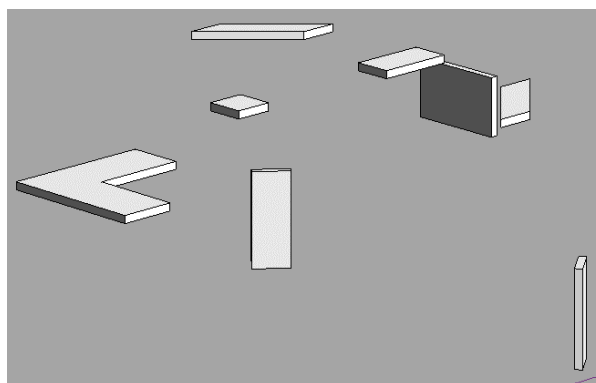
Para criar elementos com formas mais complexas a partir dos dados da estrutura modelada em Robot os utilizadores são obrigados a criar instâncias individuais, correndo o risco de sobrecarregar o modelo com

dezenas de objetos sem conexão a nenhuma família específica ou criar os objetos como elemento de massa. A criação destes elementos de massa obriga a modelar estes objetos em ficheiros separados do modelo (criando novas famílias Revit) e importando esses objetos como um todo para o modelo global. É deste modo que também é possível importar representações geométricas dos negativos em Robot.

A folha de cálculo para dimensionamento e modelação estrutural está programada para importar coordenadas de negativos que possam existir na estrutura, assim como a espessura do painel onde estes negativos estão inseridos. Desta forma é criada uma massa com modelos dos negativos e a espessura do painel onde irão ser inseridos em Revit. Basta importar a massa para o modelo, posicioná-la e criar os negativos.



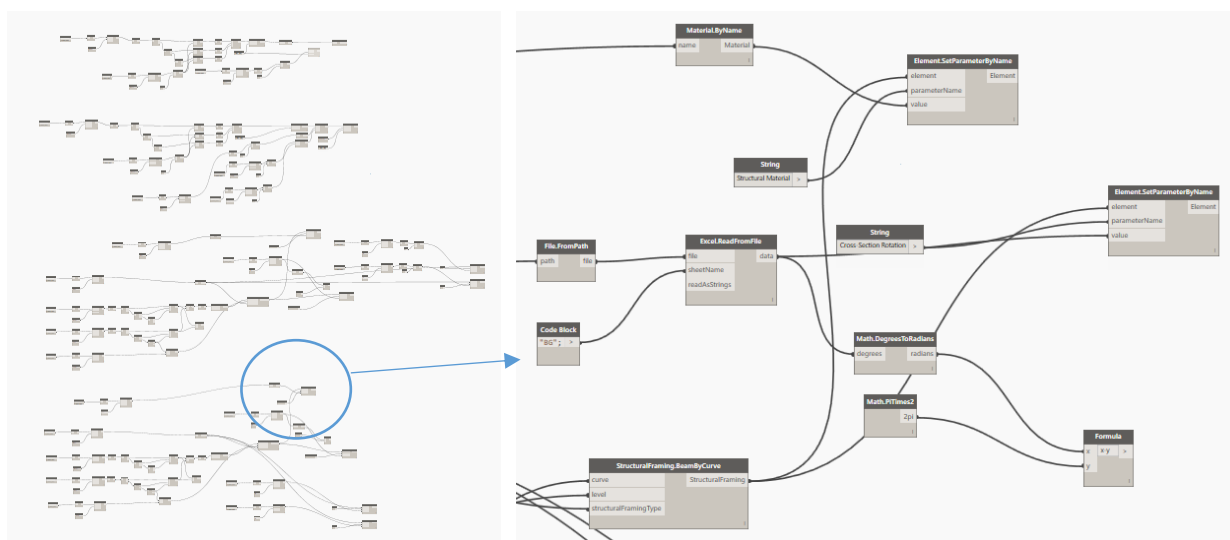
a) Modelo de massa de Paredes



b) Modelo de massa de Negativos

Figura 3.112 – Exemplos de criação de massas complexas em Revit a partir do Dynamo

Para a criação de elementos e famílias que não existam em Revit é necessário garantir que estas são criadas e carregadas previamente ao uso do Dynamo, ou se a família a criar for uma derivação de um tipo existente basta utilizar o Dynamo para duplicar a família e atribuir as dimensões desejadas à mesma. Para isso foram utilizados nós pertencentes a *Packages* disponíveis para *download*. Os nós para duplicação de elementos pertencem ao *Package* com o nome *Clockwork*, existem muitos pacotes com nós disponíveis e que possuem uma vasta gama de utilidades. Caso não se encontre aquilo que é preciso nesses pacotes, é possível criar nós personalizados através dos *Custom Nodes*. Nesses nós personalizáveis podem-se agrupar as várias ligações entretanto criadas e definir apenas os *inputs* e os *outputs*, libertando espaço da interface de programação. Outra forma é recorrer ao *Code Block*, onde o utilizador pode definir por extenso cada nó, definindo os *inputs* e os *outputs*, tal como num *custom node*, mas sem recorrer a mais nenhum nó a não ser o de código. Esta opção já requer uma vasta experiência de utilização do programa. Outra opção é a criação de funções em nós com linguagem *Python*, sendo este um recurso que permite alcançar resultados mais avançados. Nesta dissertação só foi utilizada esta linguagem a partir dos nós provenientes dos pacotes carregados.

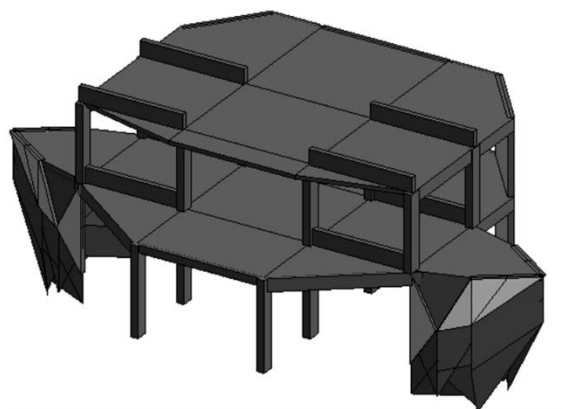


a) Criação de estruturas

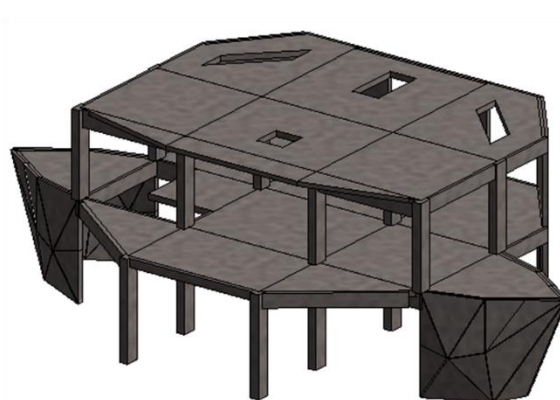
b) Pormenor sobre criação de vigas

Figura 3.113 – Programação em Dynamo – Rotinas para criação de um modelo estrutural em Revit

O resultado final está sempre dependente da informação carregada para o Dynamo e das preparações feitas em Revit, como a verificação dos materiais e famílias paramétricas presentes no modelo. É a partir do Dynamo que se vai automatizar a criação de armaduras e da modelação estrutural em Revit. Pretende-se assim reduzir o tempo de modelação, mas sempre com atenção às limitações existentes e ao fluxo BIM presente. O uso do Dynamo justifica-se pelas capacidades de modelação alcançadas (veja-se a título de exemplo a figura 3.114).



a) modelo integrado em Revit a partir do Robot



b) modelação em Revit a partir do Dynamo com intermediação do MS-Excel

Figura 3.114 – Comparação de modelos estruturais

4 PRODUÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS BIM

4.1 *ADD-IN* PARA CRIAÇÃO ASSISTIDA DE ARMADURAS DE BETÃO ARMADO

Já foram abordadas algumas ferramentas nos capítulos anteriores que permitem a modelação faseada de armaduras nos mais variados elementos de betão armado. Estas podiam ser ferramentas originais dos programas ou elementos incorporados por meio de API's. O objetivo desta dissertação passa pela criação automática destes elementos em massa, ou seja, após o dimensionamento, ver integrada a solução de todos os elementos selecionados de uma só vez no modelo BIM da estrutura, semelhante ao que é alcançado com a integração direta do modelo Robot em Revit, mas sem passar pela fase de modelação elemento a elemento na fase de dimensionamento.

Para alcançar este objetivo é utilizado o *software* Dynamo, como já foi referido no capítulo anterior. Antes de iniciar a explicação de como é conseguida essa modelação é necessário compreender o modo de funcionamento do Dynamo e dos nós de programação que permitem obter os resultados desejados. Existem essencialmente dois métodos para criação de modelos paramétricos em Revit, reconhecidos como elementos de armaduras, a partir do Dynamo. O primeiro método consiste na utilização de nós específicos para a introdução de varões e estribos com base num conjunto de parâmetros relativos ao processo de modelação manual, como a família de varão, a forma, a orientação, ângulo dos ganchos, etc. A segunda metodologia baseia-se na criação de elementos paramétricos tridimensionais representativos das armaduras e que podem ser importados para Revit como elementos de armadura. A diferença é que neste segundo método o modelo 3D da armadura é gerado em Dynamo e só depois é integrado, enquanto que no primeiro definimos todos os parâmetros e o elemento é criado em Revit, ficando em Dynamo uma representação do traçado dos diversos elementos das armaduras.

Um bom exemplo da aplicação do primeiro método pode ser encontrado na página *Revit Beyond BIM* um artigo da autoria de *Dieter Vermeulen* [52] onde é fornecido um *script* para modelação de armaduras em pilares de geometria complexa. A utilização deste primeiro método garante que todos os elementos criados contêm na sua composição todas as informações relativas ao material, geometria, número de elementos, etc., mas obriga à aplicação a peças isoladas, ou seja, para atribuir armaduras a estes elementos. Não foi possível criar listas com referência a todos os objetos de betão armado da estrutura, simplesmente porque o Dynamo não aparenta estar preparado para aceitar esse tipo de argumento.

Mesmo que seja necessário aplicar varões de diferentes diâmetros os utilizadores são obrigados a criar partições e a distribuir essas informações por diferentes listas de modo a serem capazes de modelar uma dada solução. Existem nós de programação visual capazes de aceitar informação relativa a um elevado número de curvas para alocação de armaduras, mas só aceitam que estas estejam associadas a um único tipo de família e forma (*shape*) de varão. Ignorar esta norma resulta numa invalidade de informação e o programa não é capaz de realizar a modelação.

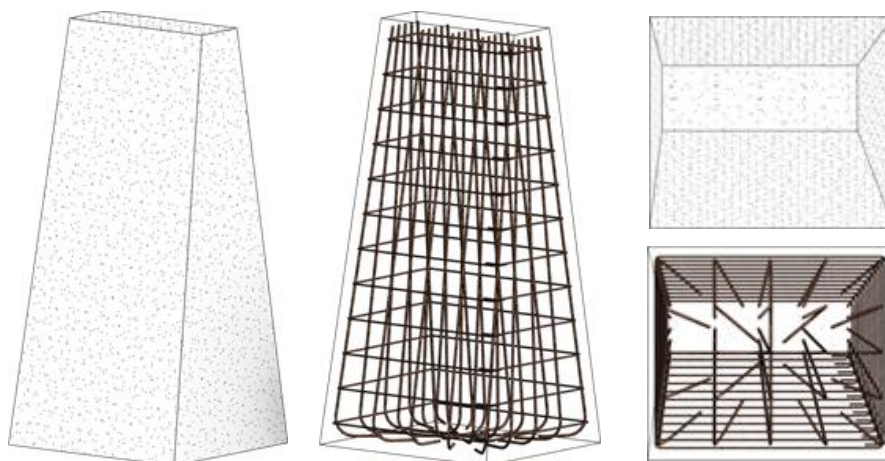


Figura 4.1 – Modelação de armaduras em pilares de geometria irregular (Dieter Vermeulen, 2015)

Em termos de objetivo, esta abordagem será equivalente à que já é possibilitada pelas extensões existentes. O que distingue o segundo método deste primeiro é a possibilidade de criar elementos representativos das armaduras para toda a estrutura sem sequer ser necessário um modelo para introdução. Esta abordagem perde relativamente à anterior no que toca à informação retida em Revit. O que acontece é que neste processo todas as informações relativas a comprimentos, coordenadas, diâmetros, categoria, etc., são gerados numa folha de cálculo MS-Excel e apesar de no fim ser possível verificar que os elementos criados estão associados à categoria de *Structural Rebar*, o Revit não é capaz de reconhecer informações geométricas como o comprimento ou o diâmetro dos elementos introduzidos. Não é algo muito preocupante uma vez que toda essa informação se encontra disponível na folha de cálculo, mas se existir a intenção de partilhar o modelo é extremamente relevante que este tipo de informação se encontre presente. Existem formas de contornar este problema, através da introdução de comentários que possuam uma descrição do material, mas numa estrutura com mais de uma centena de varões, a leitura individual de cada um desses elementos revela-se uma tarefa quase impossível e pouco ou nada produtiva.

Nesta dissertação optou-se pela opção de modelação global pelo segundo método. A abordagem a este tipo de ferramenta acaba por ter um foco maior para uma fase de estudo prévio de uma estrutura em betão armado, criando uma visão rápida daquilo que pode vir a ser uma solução futura, realizando uma estimativa orçamental e permitindo ao engenheiro responsável pelo projeto uma primeira análise à

estrutura com um dimensionamento aos Estados Limites Últimos. Pode-se ver esta ferramenta como útil para uma avaliação de projeto numa fase de elaboração de proposta para entrada em concurso público/privado.

Existia uma terceira hipótese que envolvia o primeiro método e a tentativa de compatibilizar o número de argumentos, ou seja, em vez de ter uma única referência do elemento com diversos varões associados, passar a ter para cada varão a modelar uma referência ao elemento de acolhimento. Ou seja, no ato da importação de dados em vez de ter a informação de 10 vigas e 100 varões, passaríamos a ter 100 varões e 100 referências. Imaginando que cada viga teria 10 varões, veríamos repetida a referência de uma viga 10 vezes, feita a associação aos elementos a modelar. Esta seria uma hipótese a testar, mas que dada a necessidade de criar alterações significativas aos algoritmos existentes e a falta de tempo para o fazer, não existiu a oportunidade de a experimentar.

4.1.1 Vigas

Voltando ao modelo de teste do caso de estudo 1 para apresentar o fluxo de trabalho efetuado começa-se numa primeira aproximação, pela modelação em Robot, com a aplicação de cargas e definição de casos de carga relativos aos estados limites em estudo. Neste caso apenas foram considerados os casos de carga correspondentes a estados limites últimos. O passo seguinte corresponde à seleção das vigas a analisar, neste caso as quatro vigas existentes no modelo. Após a seleção é iniciada a folha de cálculo criada e é selecionado o botão para importação de dados.

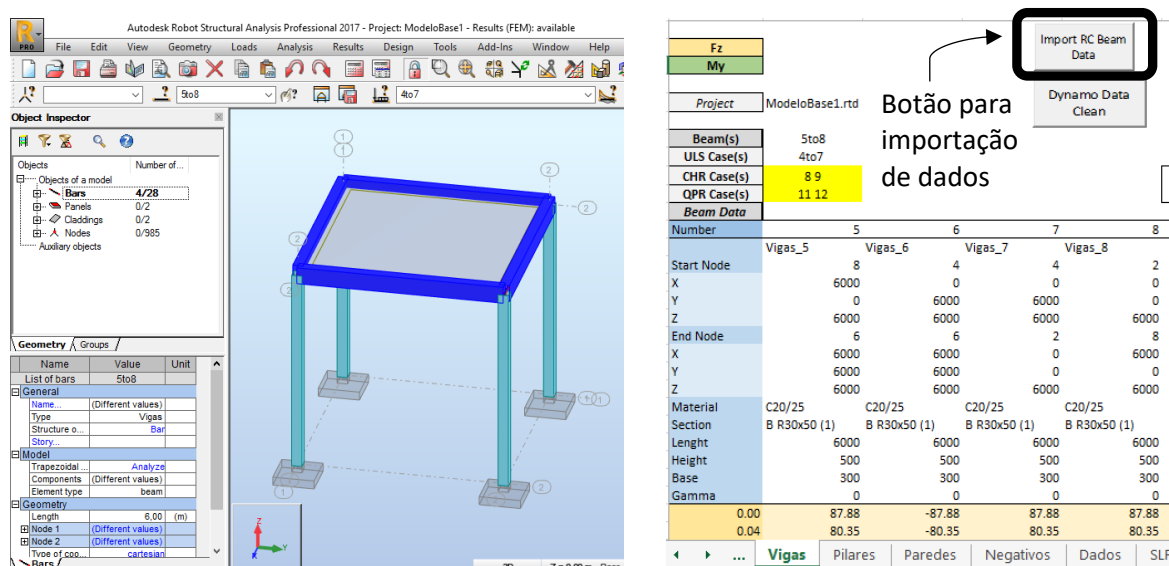


Figura 4.2 – Importação de dados de vigas para MS-Excel

No conjunto de dados importados encontram-se as coordenadas de início e fim das barras, o tipo de betão, secção, os nomes das vigas, altura e largura das secções e os comprimentos totais das vigas. São

também importados os esforços de corte segundo o eixo ZZ e os esforços de flexão em torno do eixo YY, ou seja, o dimensionamento irá considerar que as vigas só estão sujeitas à flexão simples.

O dimensionamento é feito elemento a elemento e apesar de não se encontrar tão desenvolvido em termos de parâmetros de cálculo considerados, a velocidade com que se analisa é muito mais rápida e os parâmetros apresentados estão sempre disponíveis para consulta.

| | Section Info | | | | | | My (kN.m) | | |
|------------------|---------------|---------------------|------------|---------------|---------------|-----------|-----------|--------------|----------|
| Beam | Material | Ref. | Lenght (m) | Height (mm) | Base (mm) | Gamma (°) | d1 | c | d2 |
| 8 | C20/25 | B R30x50 (1) | 6 | 500 | 300 | 0 | -24.62 | 94.42 | -24.62 |
| | | | | | | | Fz (kN) | | |
| Lifetime | 15 to 30 (S3) | Welded Reinf. | N | dg | 15 mm | | d1 | Máx/Min | d2 |
| Environment | XC2/XC3 | Bond Cond. | A | Steel Density | 7852.71 kg/m³ | | 87.88 | -87.88 | -87.88 |
| Steel | A400 NR SD | E _{sd} (%) | 1.74 % | | | | | 87.88 | |
| C _{nom} | 30 mm | | | | | | | Element Data | Quantity |
| Concrete Volume | 3.60 m³ | Formwork Area | 31.20 m² | Steel Weight | 166.81 kg | | Concrete | 0.90 m³ | 66.09 € |
| Concrete Cost | 264.35 € | Formwork Cost | 624.00 € | Steel Cost | 119.38 € | | Formwork | 7.80 m² | 156.00 € |

a) Dados geométricos, esforços máximos, medição de quantidades

| | | | As,calc (ULS) | | | As,min | As,max |
|--------|-----------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|-----------|
| d,calc | fcd | fyd | d1 | c | d2 | | |
| 0.45 m | 13.33 MPa | 347.83 MPa | 1.60 cm²/m | 6.44 cm²/m | 1.60 cm²/m | 1.93 cm² | 60.00 cm² |
| | | | x _{top} | x _{top} | x _{top} | | |
| | | | 0.017 m | 0.069 m | 0.017 m | | |
| | | | ε _s (%) | ε _s (%) | ε _s (%) | | |
| | | | 88.24 % | 19.25 % | 88.24 % | | |

b) Estimativa de armadura para um caso simplificado

| Position | | n | ø | Dispositions | As | d | d livre |
|--------------------|---------|--------|----------|--------------|------------|------------|-----------|
| Bend,Top | d1 | 2 | 8 | c | 2.00 cm² | 0.460 m | 63.33 mm |
| | c | 2 | 8 | l | 1.00 cm² | 0.457 m | 206.00 mm |
| | d2 | 2 | 8 | c | 2.00 cm² | 0.460 m | 63.33 mm |
| Bend,Bottom | Base | 2 | 12 | l | 2.26 cm² | 0.455 m | 198.00 mm |
| | Reinf. | 4 | 12 | m | 6.78 cm² | 0.458 m | 30.00 mm |
| | | | | | | | |
| Vrd | Pos. | ø | l | Branches n° | Asw/s | (Asw/s)min | VSd |
| | Vsd Min | 6 | 20 | 2 | 2.82 cm²/m | | 87.88 kN |
| | Curtail | 6 | 20 | 2 | 2.82 cm²/m | 2.68 cm²/m | - |
| | Vsd Máx | 6 | 20 | 2 | 2.82 cm²/m | | 87.88 kN |
| Cost/Quantity Data | | Weight | 41.70 kg | Cost | 29.851 | | |

c) Dimensionamento, medição de quantidades de aço

| μ | ω | x | α | Ver. α | ε _s (%) | MSd | MRd | L | |
|---------------------|-------------------|-------------------------|-------|------------|--------------------|-------|---------|---------|--------|
| 0.029 | 0.038 | 0.255 m | 0.555 | KO | 2.81% | 24.62 | 31.274 | 300.00 | 0.04 |
| - | - | - | - | - | - | - | 15.740 | 6000.00 | |
| 0.029 | 0.038 | 0.255 m | 0.555 | KO | 2.81% | 24.62 | 31.274 | 300.00 | 0.96 |
| - | - | - | - | - | - | - | 34.973 | 6000.00 | 700.00 |
| 0.113 | 0.129 | 0.139 m | 0.302 | OK | 8.07% | 94.42 | 100.628 | 4600.00 | 700.00 |
| V _{Rd,max} | V _{Rd,s} | Define Rebar Curve Data | | n Stirrups | | | | L | sl |
| 430.56 kN | 100.42 kN | | | 0 | 1 | | 1 | 0.00 | 0.00 |
| | 100.42 kN | | | 30 | 6000.00 | | 0.00 | 6000.00 | 200.00 |
| | 100.42 kN | | | 6000 | 1 | | 0 | 0.00 | 0.00 |

d) Parâmetros para avaliação de conformidade da solução, largura da faixa de aplicação

Figura 4.3 – Dimensionamento de vigas em MS-Excel

Este dimensionamento passa por quatro secções, cada uma referente às imagens presentes na figura 4.3. A secção a) apresenta os dados relativos ao vão, à geometria da peça, os esforços máximos de flexão e corte nas extremidades e a meio vão, o valor de recobrimento nominal definido a partir dos dados referentes à classe de exposição e tempo de vida da estrutura, a classe de aço e diâmetro máximo do agregado. São ainda apresentadas as medições individuais de volume de betão e área de cofragem com

os respetivos custos. Existe na imagem uma área com os valores de medição totais das vigas onde se apresentam os totais dos elementos que se encontram dimensionados.

A segunda secção dá uma estimativa da área de aço necessária para garantir a resistência da viga aos esforços, os valores de extensão e os valores de área mínima e máxima de aço que a peça admite. A secção seguinte permite definir uma solução final de armaduras. O princípio deste dimensionamento baseia-se na definição de uma armadura base de dois varões sendo dada ao utilizador a opção de adicionar até oito varões intermédios com um diâmetro diferente da armadura base. Na armadura superior são definidas três zonas, as duas extremidades e a zona a meio vão. Nas extremidades é contabilizada a armadura base e o reforço de armadura definido, que pode ser diferente em cada extremo. Na armadura inferior a base percorre o vão total da viga e o reforço é atribuído para um intervalo intermédio onde existam esforços com relevância para essa armadura adicional. A armadura transversal também é definida por secções, tendo uma definição de soluções semelhante à da armadura de flexão superior, com três zonas de aço.

Nesta secção, além do diâmetro e do número de varões é facultado o peso do aço e o custo associado à solução definida, as áreas de armadura, a altura útil e o espaço livre entre varões. Existe ainda a possibilidade de atribuir mais ramos aos estribos, mas na fase de modelação esta opção não se encontra programada. São feitas verificações ao espaçamento livre mínimo entre varões e às áreas de aço aplicadas.

Na imagem anteriormente apresentada, a figura 4.3 d), é representada a análise à capacidade resistente da solução e a verificação da viabilidade da solução, sendo considerados os valores de resistência à flexão e ao corte. Neste processo são também analisados os valores de extensão do aço, para verificar se este se encontra no patamar de cedência, os valores de profundidade do eixo neutro e o momento reduzido. Estes parâmetros são tidos em conta por serem de extrema importância para a segurança estrutural da peça e para verificação dos critérios de economia. Por exemplo, se os valores de extensão da armadura forem inferiores ao patamar de cedência significa que a solução não é económica e que a secção pode estar sujeita a uma rotura frágil. Além disso o EC2 limita o valor da profundidade do eixo neutro para que sejam cumpridos os requisitos de ductilidade/capacidade de rotação da viga. É claro que neste ponto podem existir inconsistências regulamentares, uma vez que o regulamento exige uma armadura mínima na secção e ao respeitarmos esta cláusula podemos desrespeitar a anterior. Sendo assim, é verificado o valor limite com um aviso a amarelo e o máximo com um sombreado avermelhado.

Os comprimentos dos varões e as respetivas zonas de dispensa, seja à flexão ou ao corte, não seguem os princípios estabelecidos no EC2 uma vez que não estão definidos os comprimentos de amarração regulamentares. É garantido um comprimento adicional nas zonas com maior concentração de esforços, mas não é aplicado de forma rigorosa o valor do comprimento de amarração dos varões. Por exemplo, imaginando uma viga do caso de estudo 1 com 6 metros de vão e considerando que para os efeitos da

análise a viga foi seccionada em 25 pontos e que a armadura base definida é capaz de suportar esforços até a um valor de comprimento do vão entre os 12% e os 16%, ou seja entre os 720 e os 840 mm de comprimento a contar do apoio, é selecionado o menor valor, neste caso os 720, mais uma redução de alguns milímetros, contando com um acerto feito em função de um arredondamento do comprimento dos varões de armadura para um valor com um máximo de uma casa decimal. No caso de estudo 1 o varão acabou por ficar com 4,6 metros de comprimento implementado entre os 0,70 metros e os 5,30 metros do vão. Na figura 4.3 é possível ver os resultados aplicados a uma dessas vigas. Nas armaduras de momento negativo o processo é ligeiramente diferente uma vez que é considerado um comprimento até ao primeiro valor positivo de flexão nos 25 pontos considerados, ou seja, nunca irá ficar com o comprimento de amarração exigido, será sempre uma aproximação. Nos esforços transversos é considerado o mesmo tipo de procedimento que nas armaduras de flexão da face inferior.

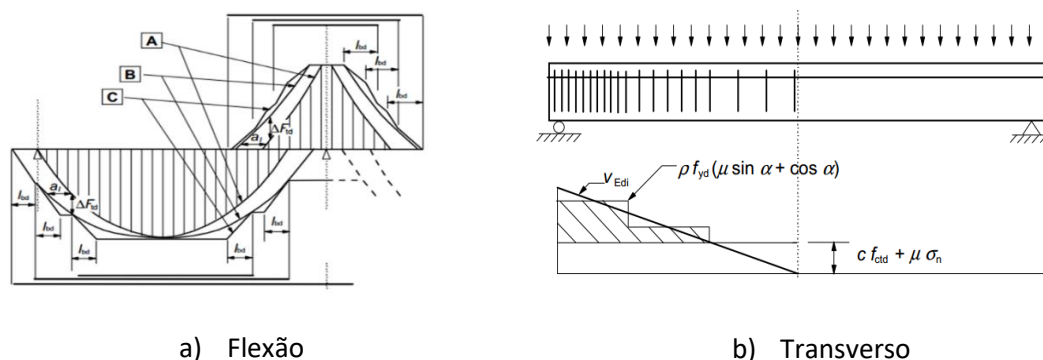


Figura 4.4 – Esquemas de distribuição de armaduras ao longo do vão segundo o EC2

A figura 4.4 tem um esquema de distribuição de armaduras transversais e de flexão que o EC2 considera ideal. Neste programa é feita uma aproximação a este modelo, mas não são seguidas as disposições regulamentares de forma exata. Nas armaduras transversais também existe uma particularidade no início da dispensa, uma vez que para conseguir o acerto da disposição dos estribos é feita a distribuição das armaduras das zonas condicionantes e a armadura de dispensa é colocada no interior do espaço em sobre com um deslocamento, face às armaduras já inseridas, equivalente a metade do espaçamento entre estribos da armadura de dispensa. Ou seja, se a armadura condicionante tiver um espaçamento de 20 cm entre estribos e a armadura de dispensa tiver 30 cm de espaçamento, na zona de transição existe um espaçamento de 15 cm entre os estribos dispostos.

O princípio de cálculo para as armaduras transversais utilizado foi o que já foi abordado no capítulo 2 no ponto relativo à regulamentação. O espaçamento final dos estribos no modelo é definido em função do comprimento do vão e de um arredondamento do número de estribos, sempre para um valor superior.

Para a flexão é utilizado o modelo de cálculo baseado nos diagramas de tensão-extensão da secção. Não é considerada armadura de compressão e é feito um deslocamento dos varões da armadura base para

que os mesmos estejam dispostos de maneira a garantir que o acondicionamento dos estribos não seja feito com uma sobreposição dos dois tipos de elementos.

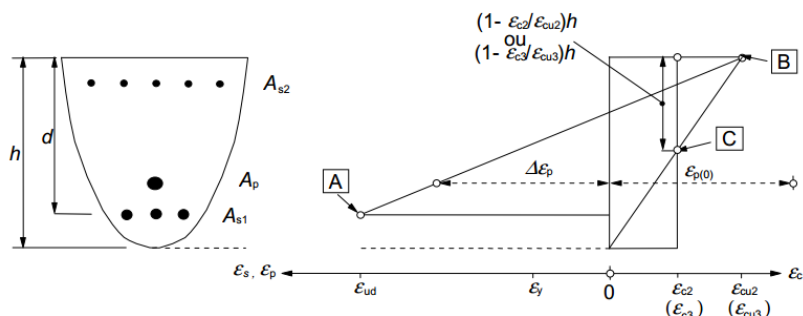


Figura 4.5 – Distribuições de extensões admissíveis no estado limite último (EC2)

Após a definição das armaduras a folha de cálculo define as coordenadas para os estribos e para as armaduras longitudinais e através do botão “*Define Rebar Curve Data*”, sendo toda a informação organizada sob a coluna referente à viga estudada. Após a definição de todas as vigas selecionando o botão “*Create Rebar Data Set*” distribui-se a informação por listas que irão ser utilizadas para a definição de parâmetros em Dynamo. Como parâmetros são considerados as coordenadas, os diâmetros e os mandris de dobragem considerados. Os valores dos mandris considerados correspondem aos valores admitidos pelo EC2 como diâmetro.

Para facilitar a criação de coordenadas o programa organiza os dados das vigas de forma a que as coordenadas de início e fim de cada viga tenha um vetor orientado da menor coordenada XX para a maior coordenada XX, ou seja o ângulo de variação das coordenadas só se dá no primeiro quadrante e no último quadrante angular de um eixo local XY colocado sobre o ponto de menor dimensão do eixo XX da viga.

Não são atribuídos pormenores de amarração nas zonas de apoio por uma simples razão, é possível ter conhecimento da largura da base uma vez que se dispõe da informação do nó de ligação de todas as vigas e dos pilares, bastando para tal procurar na folha dos pilares qual o elemento que possui o mesmo nó e importar essa informação para a folha das vigas. O problema é que será necessário entrar com o ângulo de rotação do pilar e da própria viga para ter um comprimento de amarração correto, isto sem pensar no comprimento ao longo da altura da viga e a possível interceção com as armaduras dos pilares. Empreender numa programação desse tipo acaba por ser pouco produtiva uma vez que é necessário ter em conta diversos fatores, proceder a testes para validação do programa e ainda realizar as devidas correções. O tempo que se acaba por desperdiçar pode ser valioso para a definição de comandos mais relevantes. O ideal seria ter este método integrado com a modelação de armaduras do primeiro método de modelação em Dynamo referido no início do capítulo, uma vez que dessa forma, mesmo que a modelação automática estivesse incompleta, seria possível modificá-la em Revit a partir das ferramentas de edição de armaduras do programa.

O resultado final acaba por ser uma modelação simplificada do dimensionamento no que toca a pormenores construtivos. Na figura 4.6 é apresentado o resultado final em Dynamo e em Revit do trabalho desenvolvido para a modelação de armaduras em vigas.

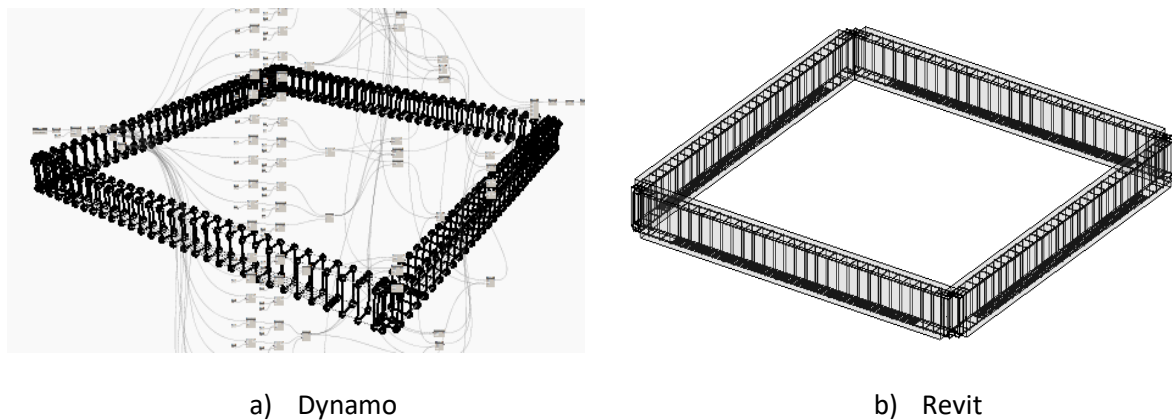


Figura 4.6 – Modelação de armaduras em vigas – Dynamo/Revit

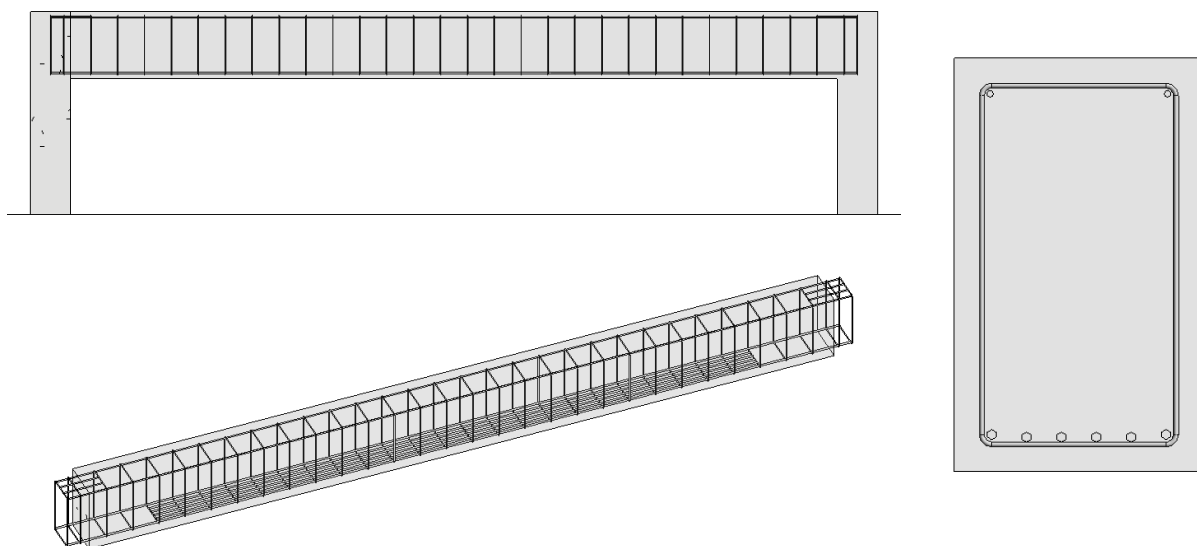


Figura 4.7 – Vistas e modelo 3D de uma viga com armaduras modeladas a partir do Dynamo

Independentemente de o resultado final ser ou não uma aproximação, existem passos que teriam de ser cumpridos em qualquer um dos métodos. Um exemplo disso são as curvas para definição do traçado das armaduras longitudinais e dos estribos. O método para criação dos estribos, ignorando a *shape* utilizada para alcançar o elemento, consiste na criação de um circuito fechado, tendo o utilizador de definir as curvas associadas ao circuito. Neste caso o circuito fechado precisou ainda que fossem definidos os arcos dos cantos para ser possível criar a representação. No caso do primeiro método de modelação de armaduras pelo Dynamo isto já não seria necessário, uma vez que o programa define automaticamente essa curvatura em função da família de varão aplicada.

O processo de modelação em Dynamo acaba por ser relativamente simples, apesar de receber um conjunto de informações bastante volumoso. Dependendo do número de elementos a importar, o básico

da modelação neste *software* passa pela tradução das coordenadas importadas do Excel para pontos ligados entre si para definição de linhas/trajetos e a partir dessas linhas gerar cilindros paramétricos com os diâmetros desejados. Tirando uma ou outra situação, como é o caso dos arcos que obrigam à definição de um vetor para execução de uma extrusão geométrica, o processo é suficientemente simples para ser desenvolvido num curto espaço de tempo. A programação em *Visual Basic* acaba por ser a parte mais complexa da programação, visto que é a partir dessa linguagem que todos os parâmetros são definidos.

A importação do Dynamo para o Revit deve ser alvo de atenção e cuidado. Existem três hipóteses para esta importação, a primeira é uma importação visual onde os elementos geométricos estão criados em Dynamo mas não são importadas as propriedades físicas dos modelos para o Revit ficando somente disponível em Revit enquanto o Dynamo estiver operacional, esta é a opção de visualização mais rápida, mas que não dá nenhuma opção de edição em Revit dos elementos paramétricos modelados. A segunda opção envolve a importação dos objetos como instâncias sem uma categoria específica e com uma referência ao objeto definida pelo Dynamo aquando do ato da importação, resultando que nenhum dos objetos se encontrará relacionado, mas já permite realizar algumas edições em Revit ao objeto selecionado (este será o método com um tempo de espera intermédio para a modelação). A última opção envolve a importação utilizando o nó “*Direct Shape*” do Dynamo, com o qual é possível definir um nome e uma categoria para o objeto importado (este é um método mais lento de importação, mas permite criar um relacionamento entre todos os objetos gerados). Tem a desvantagem de obrigar a introduzir um nome único para cada objeto.

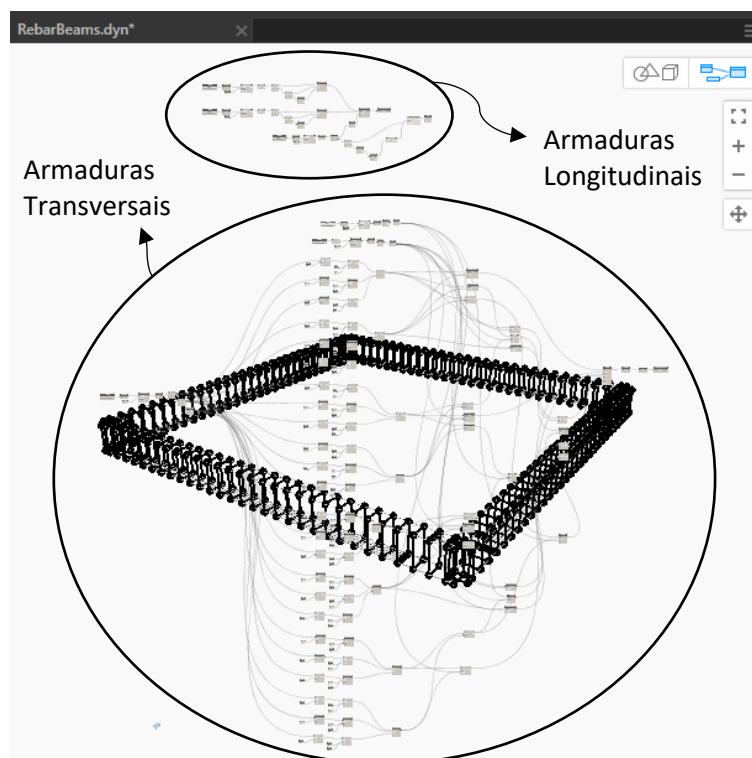


Figura 4.8 – Script para criação de modelos de armaduras em vigas

4.1.2 Pilares

Para pilares a linha de raciocínio seguida é semelhante à da folha de cálculo das vigas. A diferença está no método de dimensionamento considerado, uma vez que se tratam de elementos que trabalham sobretudo sob efeitos de uma flexão composta, que pode ou não ser desviada. Por essa razão, os dados importados do *software* de análise são os esforços de flexão segundo os dois eixos principais de flexão locais da peça, os esforços transversos associados a esses mesmos eixos e o esforço máximo de compressão no pilar, além dos dados geométricos e demais informações igualmente importadas no caso das vigas.

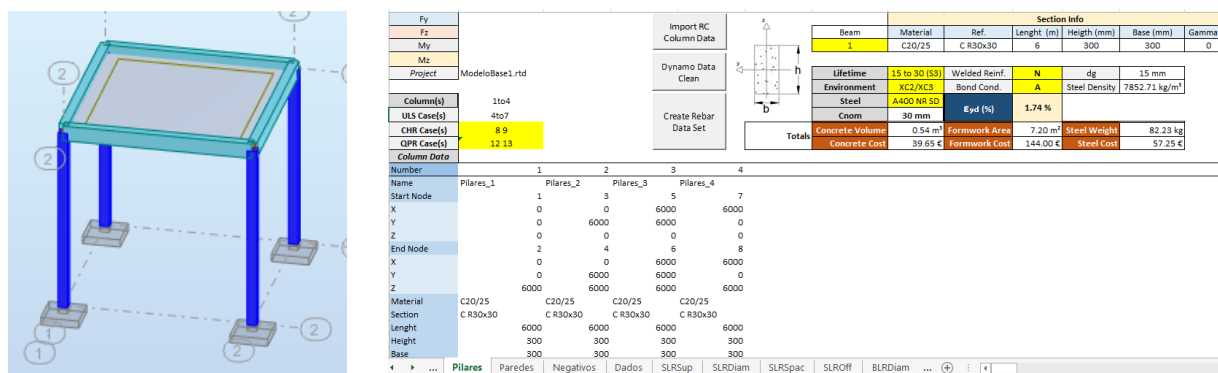


Figura 4.9 – Importação de dados de pilares para MS-Excel

A grande diferença entre o método de cálculo dos pilares para vigas demarca-se logo pelos valores finais atribuídos aos esforços de dimensionamento. Uma vez que se está a considerar o efeito da compressão, o EC2 obriga a que sejam considerados os efeitos desfavoráveis de eventuais imperfeições geométricas numa análise aos ELU. O EC2 atribui um valor de excentricidade mínima, uma vez que estas já se encontram consideradas nos coeficientes de segurança materiais, de qualquer modo, para esta folha de cálculo, faz-se uma verificação em função do maior valor alcançado, seja este a excentricidade mínima ou o acréscimo por via do cálculo do valor de uma força transversal. É utilizado o cálculo de uma força transversal visto que este é o método recomendado para elementos isolados hiperestáticos (EC2 ponto 5.2 (7)).

O cálculo do valor teórico das imperfeições é representado por uma inclinação θ_i , que é definido pela seguinte expressão:

$$5.2 (5) \quad \theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (5.1)$$

θ_0 Valor básico; O valor recomendado é 1/200;

α_h Coeficiente de redução relativo ao comprimento ou à altura: $\alpha_h = 2/\sqrt{l}$; $2/3 \leq \alpha \leq 1$;

α_m Coeficiente de redução relativo ao número de elementos: $\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + 1/m)}$;

l Comprimento ou altura [m];

m Número de elementos verticais que contribuem para o efeito total

Como se trata de uma análise isolada do elemento o valor de m é igual a 1 e o valor l é igual ao comprimento real do pilar. A partir da inclinação θ_i é possível determinar a excentricidade, ou o esforço transversal que conduz ao momento máximo.

Excentricidade e_i :

$$e_i = \theta_i * l_0 / 2$$

Ou, força transversal H_i :

$$H_i = \theta_i * N$$

A expressão acima é aplicável a elementos não contraventados.

l_0 é o comprimento efetivo do pilar e N é o esforço normal.

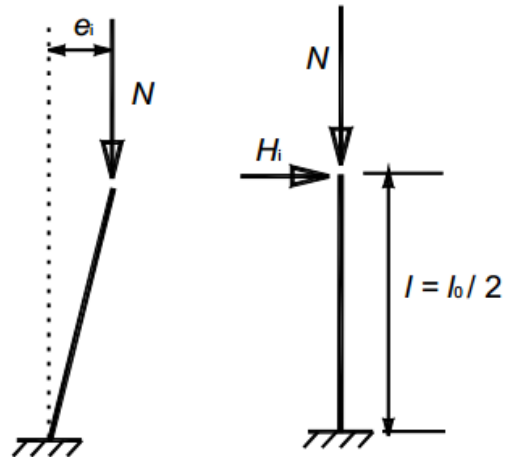


Figura 4.10 – Elementos isolados sujeitos a um esforço normal excêntrico ou a uma força transversal

O momento resultante desta força transversal é de seguida acrescido ao esforço obtido a partir da análise estática, servindo a junção destes como resultado para um momento de primeira ordem. Seguidamente seria necessário proceder à verificação da necessidade de considerar esforços de segunda ordem no dimensionamento do pilar aos ELU. O EC2 indica que estes podem ser ignorados se representarem menos de 10% dos efeitos de primeira ordem. Nesta folha de cálculo a verificação é feita a partir do método simplificado para elementos isolados do EC2 5.8.3.1 (1), tendo-se optado por ter sempre em conta os efeitos de segunda ordem.

Para a determinação do esforço final de flexão recorreu-se ao método baseado numa rigidez nominal presente no ponto 5.8.7 do EC2.

$$5.8.7.3 (1) \quad M_{Ed} = M_{0,Ed} \left[1 + \frac{\beta}{(N_B / N_{Ed}) - 1} \right] \quad (5.28)$$

$M_{0,Ed}$ Momento de primeira ordem;

β Coeficiente que depende da distribuição dos momentos de primeira e segunda ordem;

N_{Ed} Valor de cálculo do esforço normal;

N_B Carga de encurvadura baseada na rigidez nominal.

Onde o momento de primeira ordem e o valor de esforço normal já se encontram definidos. Resta determinar o valor da carga de encurvadura seguindo o método de Euler e o valor do coeficiente. O valor do coeficiente é obtido em função do tipo de distribuição do momento de primeira ordem e admite-se que o momento de segunda ordem tem uma distribuição sinusoidal. O EC2 define a seguinte expressão para o cálculo deste coeficiente para elementos isolados de secção e esforço normal constantes.

$$5.8.7.3 (2) \quad \beta = \pi^2 / c_0 \quad (5.29)$$

c_0 Coeficiente que depende da distribuição do momento de primeira ordem;

O valor de c_0 pode ter o valor de 8 se o momento for constante, 9,6 se for uma distribuição parabólica ou 12 se se tratar de uma distribuição triangular simétrica. Caso as situações anteriores não se apliquem o EC2 recomenda a atribuição de um valor de ordem unitária ao coeficiente β , admitindo que esta se trata de uma simplificação razoável.

O valor da carga critica de encurvadura é obtido segundo a seguinte expressão:

$$N_B = \frac{\pi^2 * EI}{l_0^2}$$

Onde l_0 é o comprimento efetivo e o valor de EI é determinado através a da seguinte fórmula:

$$5.8.7.2 (1) \quad EI = K_c * E_{cd} * I_c + K_s * E_s * I_s \quad (5.21)$$

K_c Coeficiente que toma em conta os efeitos da fendilhação, da fluência, etc.;

E_{cd} Valor de cálculo do módulo de elasticidade do betão; $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{CE}$

E_{cm} Módulo de elasticidade secante do betão;

γ_{CE} Coeficiente de segurança. Valor recomendado de 1,2;

I_c Momento de inércia da secção transversal do betão;

K_s Coeficiente que toma em conta a contribuição das armaduras;

E_s Valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço das armaduras;

I_s Momento de inércia das armaduras em relação ao centro da área do betão;

ρ Taxa geométrica de armaduras, A_s/A_c .

O valor de K_s considerado pode ser um valor unitário desde que o valor de ρ seja superior ou igual a 0,002. O valor de K_c é dado pela seguinte expressão:

$$5.8.7.2 (2) \quad K_c = k_1 * k_2 / (1 + \varphi_{ef}) \quad (5.22)$$

φ_{ef} Coeficiente de fluência efetivo.

$$5.8.7.2 (2) \quad k_1 = \sqrt{f_{ck}/20} \text{ (MPa)} \quad (5.23)$$

k_1 Coeficiente que depende da classe de resistência do betão.

$$5.8.7.2 (2) \quad k_2 = n * \frac{\lambda}{170} \leq 0,20 \quad (5.24)$$

k_2 Coeficiente que depende do esforço normal e da esbelteza;

n Esforço normal reduzido, $N_{Ed}/(A_c * f_{cd})$;

λ Coeficiente de esbelteza, l_0/i

i Raio de giração da secção de betão não fendilhada.

O valor de fluência não é calculado, tendo-se admitido um valor de coeficiente igual a 3,5. Como o cálculo da rigidez nominal se encontra dependente das armaduras consideradas, na folha de cálculo o valor do momento de dimensionamento encontra-se em constante adaptação.

| ULS Comb. Results | | | Design Loads & Values | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|-----------------------|------------|----------------|------------------|------------------|-----------------------|---------|
| Nx Máx Abs | My Máx Abs | Mz Máx Abs | M _o IG | MyEd | MzEd | λ_y | λ_z | λ_y/λ_z | 5.38b 1 |
| 197.80 kN | 24.29 kN*m | 24.29 kN*m | 4.84 kN*m | 34.82 kN*m | 34.82 kN*m | 69.28 | 69.28 | 1 | 1 |
| | Fz | Fy | θ_i | β_y | β_z | $l_o y$ | $l_o z$ | λ_z/λ_y | 5.38b 2 |
| Máx | -6.07 kN | 6.07 kN | 0.004082483 | 1.03 | 1.03 | 6 | 6 | 1 | 1 |
| Mín | -6.07 kN | 6.07 kN | Hi | $c_o y$ | $c_o z$ | iz | iy | ey | ez |
| | | | 0.81 kN | 9.6 | 9.6 | 0.08660254 | 0.08660254 | 0.18 | 0.18 |
| Element Data | Quantity | Cost | λ_{lim} | NBy | NBz | fcd | fyd | beq | heq |
| Concrete | 0.54 m³ | 39.65 € | 26.55 | 1239.99 kN | 1239.99 kN | 13.33 MPa | 347.83 MPa | 0.3 | 0.3 |
| Formwork | 7.20 m² | 144.00 € | M const. | M Par. | M Triang. Sim. | ky (Eff. Lenght) | kz (Eff. Lenght) | 5.40a | OK |
| | | | 8 | 9.6 | 12 | 1 | 1 | 5.40b | OK |

a) Parâmetros iniciais e cargas de dimensionamento

| Reinforcement Data | | | | | | Nsd | Nrd | Bending YY | | | | | | | | |
|--------------------|--------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------|----------|-----------|-----------|---------|---------|-------|-------------|-------------|
| Bend. | n | ø | As/2 | d | d.livre | 197.80 | 3069.91 kN | μ | ω | x | α | Ver. α | es (%) | MSd | MRd | |
| Base | 2 | 20 | 6.28 cm² | 0.251 m | 0.251 m | Biaxial | Vrd,c | 0.135 | 0.353 | 0.377 m | 1.484 | KO | -1.14 % | 34.82 | 73.853 | |
| H (My) | 2 | 16 | 10.30 cm² | 0.254 m | 49.33 mm | 0.96 | 240.36 kN | Bending ZZ | | | | | | | | |
| B (Mz) | 2 | 16 | 10.30 cm² | 0.254 m | 49.33 mm | | | μ | ω | x | α | Ver. α | es (%) | MSd | MRd | |
| Shear | ø | // | Asw/s | As.total | 53.76 cm² | Vsd | Vrd,s | 0.135 | 0.353 | 0.377 m | 1.484 | KO | -1.14 % | 34.82 | 73.853 | |
| Máx | 6 | 15 | 3.76 cm²/m | sl,ext. B | N/A | 6.07 kN | 74.74 kN | Nsd/Nrd | 0.06 | Ecd | 25.0 GPa | k1 | 1.00 | lc y | 6.75E-04 m⁴ | |
| curtail | 6 | 22.5 | 2.52 cm²/m | sl,int. B | 67.333333 | - | 50.09 kN | a | 0.97 | Es | 200.0 GPa | k2 y | 0.07 | lc z | 6.75E-04 m⁴ | |
| Min | 6 | 15 | 3.76 cm²/m | sl,ext. H | N/A | 6.07 kN | 74.74 kN | p | 0.060 | El y | 4522.94 | k2 z | 0.07 | ls y | 2.23E-05 m⁴ | |
| Cost/Quant | Weight | 141.44 kg | | ^2 | | 67.333333 | øwl,min | 6 | As,min | As,máx | El z | 4522.94 | kc y | 0.01 | ls z | 2.23E-05 m⁴ |
| Data | Cost | 98.11 € | | stcl,máx | | 24 | 0.6*stcl,min | 14 | 1.80 cm² | 36.00 cm² | ks | 1.00 | kc z | 0.01 | øef | 3.50 |

b) Parâmetros finais e verificação de segurança

Figura 4.11 – Dimensionamento de pilares em MS-Excel

O EC2 indica ainda duas verificações no ponto 5.8.9 do regulamento que caso se verifiquem permitem que a segurança seja verificada independentemente para cada uma das direções principais.

Na folha a segurança à flexão desviada é sempre verificada. Outro pormenor é o do cálculo da inércia nas armaduras, que só contabiliza as armaduras mais relevantes para cada sentido, ou seja, os varões de canto e as fiadas que mais contribuem para um valor de inércia superior num dado sentido.

A verificação de segurança à flexão desviada é feita através de um método simplificado com base na expressão seguinte do EC2:

$$5.8.9 (4) \quad \left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}} \right)^{\alpha} \leq 1,0 \quad (5.39)$$

$M_{Edz/y}$ Momento de cálculo em relação ao eixo considerado, incluindo um momento de segunda ordem;

$M_{Rdz/y}$ Momento resistente na direção considerada;

α Expoente.

Como no programa só são consideradas secções retangulares o valor do expoente necessita de ser determinado através de uma interpolação, dada em função da relação entre o valor de compressão atuante e do valor resistente do pilar à compressão.

| | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|
| N_{Ed}/N_{Rd} | 0,1 | 0,7 | 1,0 |
| α | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Para o dimensionamento são consideradas algumas limitações semelhantes às das vigas, existindo a opção de definição de uma armadura de base que é a armadura de canto e uma armadura com um diâmetro diferente da de base que preenche o espaço entre os varões de canto. Só é definida metade da armadura, ou seja, dois varões, considerando que o retângulo tem quatro cantos e leva um varão por canto. As fiadas dispostas entre esses dois varões são definidas do mesmo modo, só metade e com um máximo de 8 varões em cada sentido. No total existirão os 4 varões de canto, mais 8 varões, no máximo, para cada face, 36 varões ao todo.

Nas armaduras de esforço transversal, é verificada a segurança, mas ao contrário das vigas, como na maioria dos casos as disposições construtivas obrigam a uma armadura superior à necessária para resistir aos esforços, o programa admite como base as disposições construtivas e fica a cargo do utilizador definir se deseja uma distribuição mais dilatada nas extremidades do pilar.

O sistema para medição e orçamentação é igual ao das vigas. A definição do número de estribos é feita de forma semelhante, existindo um pormenor na modelação final que foi aplicado para que os estribos no modelo tridimensional não comessem na extremidade dos pilares e que consiste basicamente em retirar um dos estribos nos extremos e reposicioná-los para que a distribuição esteja mais bem conseguida no modelo. Essa redução no número de estribos não é contabilizada na medição de quantidades de aço.

Os varões longitudinais também sofrem uma redução que não é contabilizada, mas que existe somente para ter em conta o valor do recobrimento na extremidade superior do pilar, por exemplo, num varão de 6 metros se o recobrimento nominal for de 3 cm, o valor do comprimento do varão no modelo é de 5,97 metros. Isto significa que os varões longitudinais terminam com uma amarração reta, mas apesar de estas simplificações de modelação prejudicarem o resultado final, uma vez que os modelos não vão de encontro ao que é exigido, as soluções alcançadas já permitem obter uma noção das necessidades aço. Seria, no entanto, necessário aperfeiçoar a programação para ser possível ter uma modelação que fosse de encontro ao exigido pelo EC2.

A nível de modelação das armaduras, o *script* é praticamente igual ao das vigas. Alteram-se alguns pormenores devido à necessidade de definir novos vetores para a modelação dos cantos dos estribos. Isto acontece porque existe uma mudança no plano de aplicação que agora fica paralelo ao plano XY. Na definição de coordenadas das vigas, estas por não estarem dependentes do ângulo de rotação da barra, o processo acaba por ser mais simples de definir, algo que não acontece em pilares. Foi possível atingir resultados satisfatórios para os ângulos de 0 e 90 graus. O cálculo das posições dos varões das fiadas intermédias, assim como dos estribos, não se encontra bem definido para os ângulos intermédios e por vezes ocorrem erros de posicionamento para os ângulos entre os 0 e os 90 graus. Apesar de se considerar que o pilar segue sempre perpendicular ao eixo XY, é necessário contar com a rotação do mesmo no plano, algo que não foi alcançado de forma convincente.

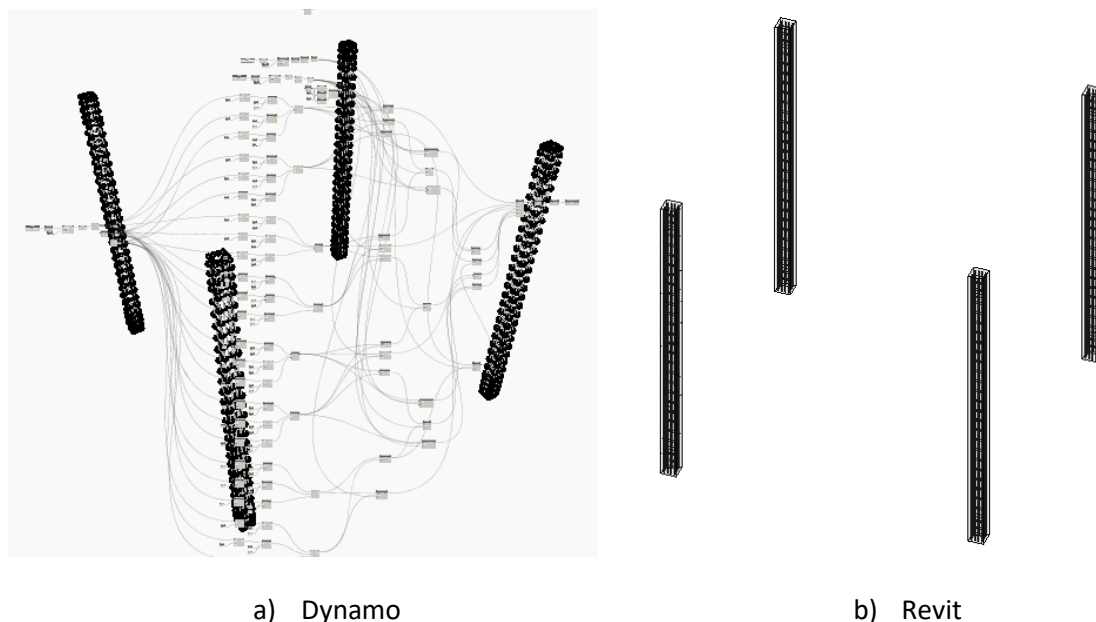


Figura 4.12 – Modelação de armaduras em pilares – Dynamo/Revit

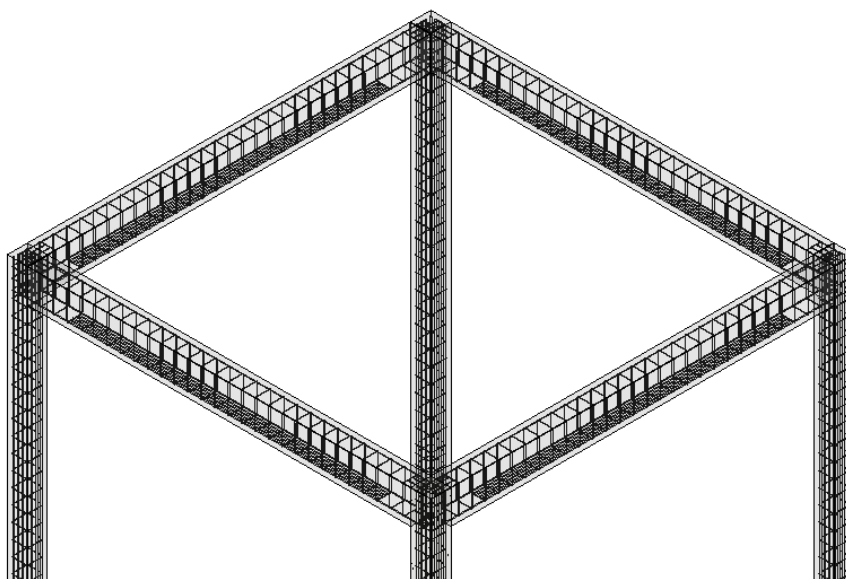


Figura 4.13 – Vista conjunta dos modelos de armaduras de vigas com os dos pilares

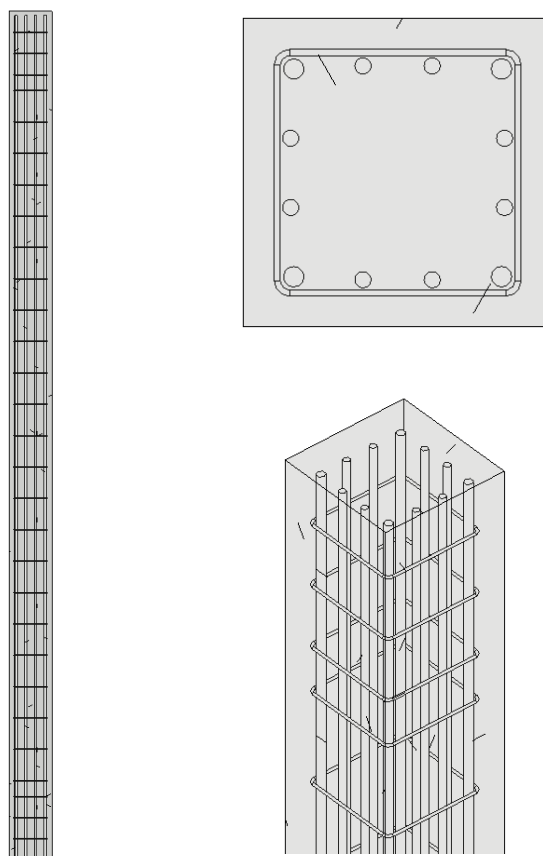


Figura 4.14 – Vistas e modelo 3D de um pilar com armaduras

4.1.3 Lajes Maciças

O módulo serve para o dimensionamento de lajes sob o efeito de flexão simples e avalia a flexão seja a laje armada em uma ou duas direções.

À semelhança dos módulos de dimensionamento anteriores, esta folha de cálculo segue o princípio de seleção dos elementos a dimensionar em Robot para de seguida ter os esforços importados para o ficheiro Excel. A diferença para os anteriores, é que existe logo uma redução da quantidade de dados que é recebida, ou seja, os valores que são importados são somente os esforços máximos e os mínimos, à flexão e ao corte, a que os painéis selecionados estarão sujeitos.

| Panel | Reference | Thickness | Material | Nodes | MXX (kN.m/m) | | | | MYX (kN.m/m) | | | | QXX (kN/m) | | QYY (kN/m) | | SLS QPR |
|-------|-----------|-----------|----------|--------------|--------------|----------|---------|----------|--------------|----------|---------|----------|------------|---------|------------|---------|--------------|
| | | | | | Top | Node no. | Bottom | Node no. | Top | Node no. | Bottom | Node no. | Max | Min | Max | Min | Displacement |
| 9 | TH25 | 250 mm | C25/30 | 2to8By2 18to | 10,003 | 6 | -43,539 | 554 | 10,003 | 6 | -43,539 | 554 | 32,939 | -32,939 | 32,939 | -32,939 | |

Figura 4.15 – Importação de dados de lajes para MS-Excel

A figura 4.15 apresenta uma vista dessa importação realizada para o painel do caso de estudo 1. Esta decisão deve-se ao facto de que quando tentamos importar os dados relativos a todos os nós da malha de um painel estamos a sobrecarregar a folha de cálculo com dados e fazê-lo para diversos painéis em simultâneo torna essa tarefa ainda mais penosa de realizar. Numa tentativa de continuar a explorar essa opção para uma análise individual rigorosa dos diversos painéis, foi acrescentada a opção “*Create Design Sheet*”. Com esta opção conseguiu-se mapear todos os nós da malha, ao importar os dados relativos aos esforços, coordenadas e deformação de cada nó da malha de um dado painel. Esta opção foi abandonada pelo excesso de tempo que era necessário para obter os dados só para um painel. Existe a hipótese de realizar a importação via API através da opção *Query*. Esta opção torna a importação de dados muito mais rápida, mas perde-se a informação relativa à posição dos diversos nós, o que torna impossível o mapeamento dos esforços via Excel. Por estas razões optou-se por simplificar a verificação e analisar somente os esforços mínimos e máximos.

Existe outra particularidade, relativa aos momentos de pico sobre os apoios em lajes contínuas. No *software*, é possível acionar a opção para reduzir os esforços em zonas de apoio, que é no fundo a dispersão do momento de pico pela largura do apoio, seja ele um pilar ou uma parede. Por alguma razão que não foi possível apurar, os esforços importados são os iniciais sem redução. É uma limitação relevante, mas não impossibilita a análise uma vez que basta reduzir os valores de cálculo na folha, apenas reduzindo a velocidade de execução da análise e do dimensionamento.

Outra opção que foi integrada foi a verificação aos estados limites de serviço para o controlo de tensões e para o cálculo da largura de fendas. Tal como no dimensionamento de pilares, esta verificação admite algumas simplificações de cálculo, com a consideração de valores recomendados para os coeficientes α_e relativos à relação entre os módulos de elasticidade do aço e do betão no cálculo das tensões para secção fendilhada. A metodologia seguida para o cálculo de tensões baseia-se na Teoria da elasticidade, também

utilizada no dimensionamento de vigas e que é baseada no equilíbrio estático entre as forças resultantes no aço e na área de betão comprimida. Este caso pode já não ser linear na verificação aos ELS uma vez que a secção pode estar fendilhada. Este cálculo envolve a determinação da profundidade do eixo neutro e de uma nova inércia da peça, fendilhada ou não. A partir desses dois valores aplicam-se as formulações habituais para a determinação de tensões.

Os passos para determinação da largura de fendas são os que vêm descritos no EC2 ponto 7.3.4

Os procedimentos de cálculo seguidos tanto para o controlo de tensões como para o cálculo de largura de fendas encontram-se descritos em maior detalhe no livro “Estruturas de betão: Bases de cálculo, segundo o Eurocódigo 2” de Paulo Cachim e Miguel Morais [1], que foi usado como base teórica para o desenvolvimento dos procedimentos de cálculo em Excel.

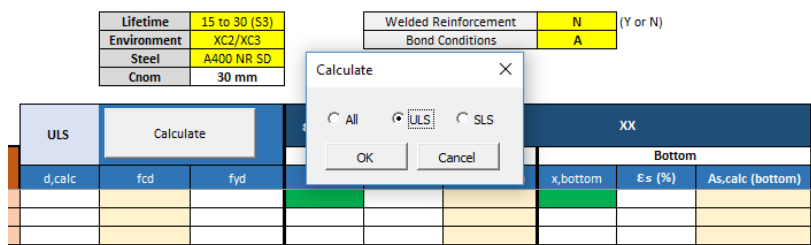


Figura 4.16 – Opções de verificação na folha de cálculo para lajes

Como se vê pela figura 4.16, existem três opções no tipo de verificação que pode ser efetuada para lajes. Os esforços que são inicialmente efetuados são os das combinações ELU, mas se o utilizador preferir, pode executar o comando para verificação aos ELS e são importados novos dados relativos às combinações que são definidas como sendo as combinações características e quase permanentes (ver figura 4.15).

A verificação aos ELU é feita de forma semelhante à das vigas, mas com a atribuição automática de uma solução de armadura em função do resultado alcançado na estimativa teórica

| ε _{gd} (%) | 1,74 % | XX | | | | | YY | | | | | As,min | As,max |
|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|--------|--------|
| Top | | | Bottom | | | Top | | | Bottom | | | | |
| x _{top} | ε _s (%) | As,calc (top) | x _{bottom} | ε _s (%) | As,calc (bottom) | x _{top} | ε _s (%) | As,calc (top) | x _{bottom} | ε _s (%) | As,calc (bottom) | | |
| 0,004 m | 203,22 % | 1,38 cm ² /m | 0,016 m | 42,83 % | 6,15 cm ² /m | 0,004 m | 203,22 % | 1,38 cm ² /m | 0,016 m | 42,83 % | 6,15 cm ² /m | | |

a) Estimativa teórica de armadura

| Reinforcement closest to element top face | | | | | | | | | | XX |
|-------------------------------------------|------------------|------------|---------|-------|----------|---------|----------|------------------|--------|--------|
| Bending XX - Top | | | | | | | | | | kN.m/m |
| As,top | Reinf. Reference | | d | μ | ω | x | α | ϵ_s (%) | | |
| 3,77 cm ² /m | ϕ | // | | | | | | | MSd | MRd |
| | $\phi 12$ | // 30,0 cm | 0,214 m | 0,013 | 0,037 | 0,331 m | 1,547 | -1,24 % | 10,003 | 27,532 |

b) Armadura atribuída automaticamente – Flexão negativa no sentido XX

Figura 4.17 – Dimensionamento de lajes em MS-Excel

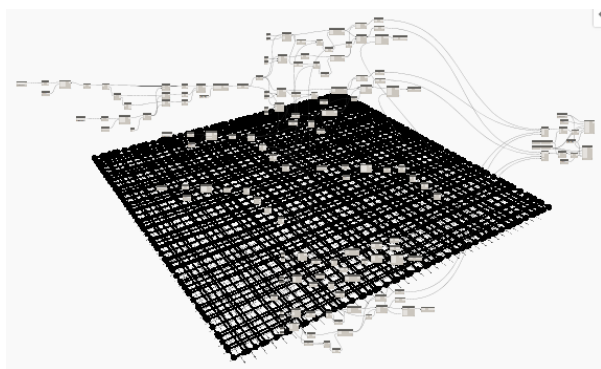
Na figura 4.17 b), como a armadura necessária é a mínima, a solução atribuída não é uma solução válida em termos de espaçamento máximo entre varões. Por ter esta possibilidade de atribuir uma solução que não respeita os limites regulamentares é possibilitada a opção de a solução ser editável. O cálculo também procura dispor as soluções da forma mais económica ao colocar a armadura, para o sentido mais condicionante, mais próxima da face do elemento. É uma opção editável, mas foi pensada para uma disposição global das armaduras, isto é, pode-se decidir qual o sentido com a armadura mais próxima da face no topo e na base da laje, mas esta decisão é aplicada a todas as lajes importadas. Por exemplo, se num piso de um edifício existem duas ou mais lajes de betão armado, o programa vai decidir qual o sentido mais condicionante em função da laje que se encontra exposta ao maior esforço. Sendo assim, o utilizador deve ter uma noção dos esforços nas lajes que está a pensar dimensionar para não cometer erros de dimensionamento.

A verificação ao esforço transversal é feita para o caso de elementos sem armadura de esforço transversal.

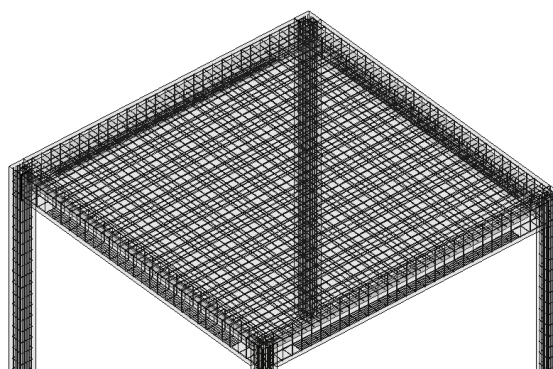
Como esta verificação tem de ser feita em função da armadura que se encontra à tração, é dada a opção de escolher se a armadura para o cálculo da verificação é a do topo ou a da base.

Na verificação à flexão é atribuída uma solução para os dois sentidos principais das lajes tanto para o topo como para a base. Os parâmetros analisados para a flexão são semelhantes aos das vigas como se pode ver pela figura 4.17 b) e 4.3 d).

Relativamente à modelação de armaduras, como se optou por não realizar o mapeamento dos esforços nas lajes, o que é feito é a atribuição de uma malha com os diâmetros associados à solução definida para os esforços máximos. Existe outra limitação relativa à disposição destes elementos a partir do Dynamo, que está relacionado com o método de modelação de armaduras em lajes. Este é diferente do método utilizado para criar esses modelos em vigas e pilares porque nestes elementos não temos como informação base duas coordenadas específicas, uma de início e outra final, em vez disso temos um conjunto de coordenadas relativas aos cantos do painel. Estas tanto podem ter quatro cantos e ser uma laje com geometria no plano regular quadrada, como podem apresentar outra forma qualquer. Apesar de ser possível criar um algoritmo capaz de analisar todas as coordenadas, este era um empreendimento demasiado ambicioso e optou-se por ter uma solução que é aplicável a lajes com quatro cantos e com ângulos internos de 90°. A razão é bastante simples, a solução alcançada tem base na identificação do contorno da laje e em função da solução definida o *script* vai dividir as linhas de contorno da laje em segmentos com o espaçamento definido na solução e criar linhas, que depois se transformam em varões, através da ligação entre os pontos de divisão do contorno.



a) Dynamo



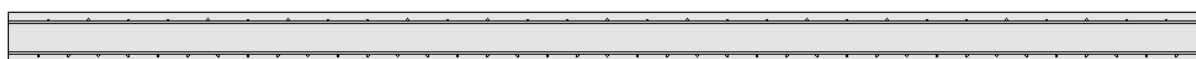
b) Revit

Figura 4.18 – Modelação de armaduras em lajes – Dynamo/Revit

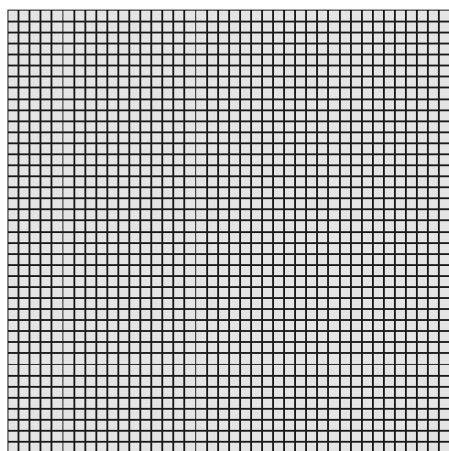
Para existir uma distribuição adaptada ao espaço disponível na laje, o espaçamento pode sofrer uma ligeira redução. Se se considerassem ângulos diferentes de 90° , tivesse a laje quatro bordos ou outro valor qualquer, já seria necessário atribuir espaçamentos em função desses ângulos e como existem armaduras em ambos os sentidos o número de pontos na laje seria, no mínimo, o dobro dos que são necessários para lajes sem variação angular, situação que poderia gerar conflitos na forma como o *script* atualmente identifica e liga os pontos definidos. Por essa razão, dado o tempo e as capacidades técnicas necessárias, não se optou por esta via de modelação.



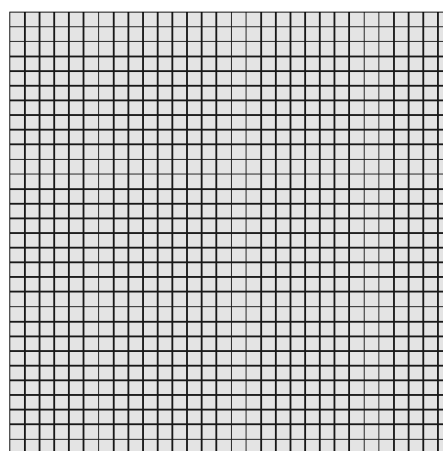
a) Sentido XX



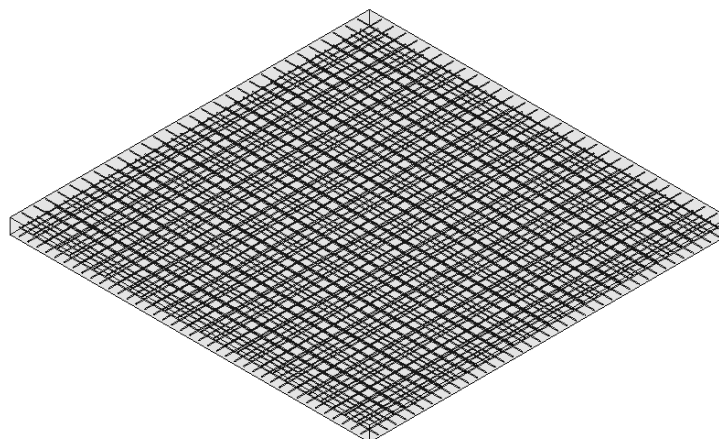
b) Sentido YY



c) Armadura inferior



d) Armadura Superior



e) Vista 3D

Figura 4.19 – Vistas e modelo 3D de uma laje com armaduras

A metodologia para a medição e a orçamentação é diferente da metodologia das vigas e pilares, uma vez que, ao contrário do que é feito em vigas e pilares, não é na folha de cálculo que são definidas as quantidades e posições do aço. Na folha é realizada a estimativa para os volumes de betão e para as cofragens, a partir das informações base importadas do *software* de análise e dos preços estabelecidos para a área de cofragem e para o metro cúbico de betão.

Para o aço, como as quantidades estão dependentes dos ajustes realizados em Dynamo, toda a contabilização é realizada no aplicativo e de seguida exportada para Excel, diretamente para a folha de cálculo de dimensionamento.

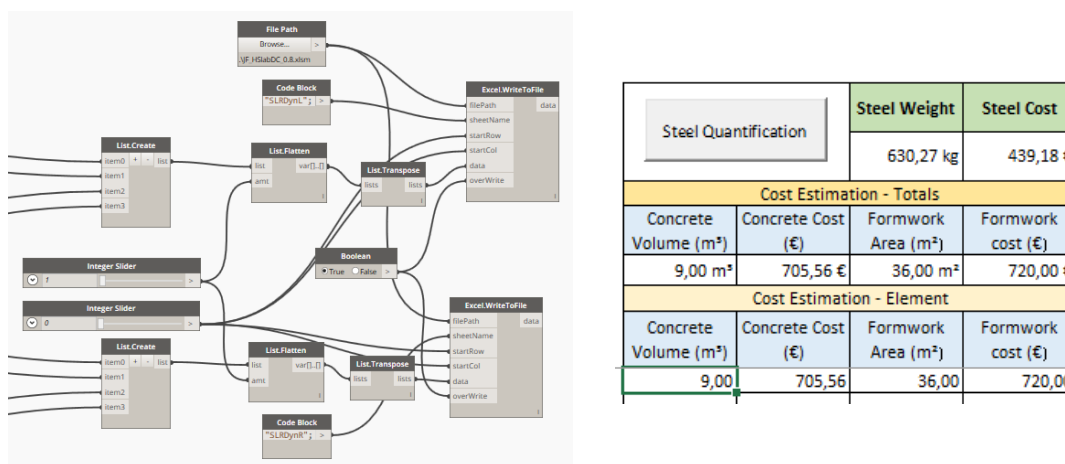


Figura 4.20 – Extração de quantidades de aço em Lajes – Dynamo/MS-Excel

A figura 4.20 apresenta a parte do *script* em Dynamo dedicado à exportação de dados e o excerto da folha de cálculo dedicado à quantificação e orçamentação.

A informação exportada para Excel não é mais que o comprimento e o raio de cada varão. Essa informação é depois tratada e convertida em peso e custo a partir do acionamento do botão de comando “*Steel Quantification*”.

4.2 ORÇAMENTAÇÃO

Para a orçamentação das quantidades de aço, betão e cofragem foram utilizados e cruzados os preços de referência da AICCOPN – Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas e da página *online orçamentos.eu*.

No anexo I é explicado em maior detalhe o método para determinação do custo atribuído por kilo de aço, mas numa explicação mais rápida, foi considerada uma média para o custo por kilo do aço do tipo 400 e do aço do tipo 500. Esta média foi adaptada para os diferentes diâmetros, sendo os menores diâmetros mais caros e a partir do diâmetro de 12 milímetros os preços são constantes, visto que a variação de preços tabelados é em média igual para os diâmetros seguintes.

Tabela 4.1 – Tabela de preços para o aço da página *orçamentos.eu*

| Euros por kilo | | | | | | |
|----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Diâmetros (mm) | a400 nr/sd em varão com 12m | a400 nr/sd em varão com 6m | a500 nr/sd em varão com 12m | a500 nr/sd em varão com 6m | a500 nr/sd em bobine LQ | a500 nr/sd em bobine LQR |
| Ø 6 | 0,75 € | 0,77 € | 0,76 € | 0,78 € | 0,77 € | 0,78 € |
| Ø 8 | 0,73 € | 0,75 € | 0,74 € | 0,76 € | 0,75 € | 0,76 € |
| Ø 10 | 0,70 € | 0,71 € | 0,71 € | 0,72 € | 0,72 € | 0,72 € |
| Ø 12 | 0,68 € | 0,69 € | 0,69 € | 0,70 € | 0,70 € | 0,70 € |
| Ø 16 | 0,67 € | 0,69 € | 0,68 € | 0,70 € | 0,69 € | 0,70 € |
| Ø 20 | 0,67 € | 0,69 € | 0,68 € | 0,70 € | | |
| Ø 25 | 0,68 € | | 0,69 € | 0,71 € | | |
| Ø 32 | 0,71 € | | 0,72 € | 0,74 € | | |

Para os custos associados ao metro quadrado de cofragem, assumiu-se um valor de 20 euros. Este é um valor médio, uma vez que existe uma variação do custo em função do elemento a betonar. Por exemplo, para vigas médias o valor tabelado aponta para um custo de 26 euros, aproximadamente, mas para sapatas esse custo ronda os 12 euros, enquanto que para paredes, pilares médios e lajes com 25 centímetros de espessura o preço ronda os 20. Fazendo uma média o preço final irá rondar os 20 euros.

O custo por metro cúbico de betão teve de ser submetido a um estudo da linha de tendência dos custos, porque não existe nas páginas consultadas informação referente a todas as classes de resistência existentes.

Tabela 4.2 – Tabela para definição do custo final do metro cúbico de betão

| Classe | f_{ck} | AICCOPN | Tendência | orçamentos.eu | Tendência | Δi | Δf | €/m3 |
|---------|----------|---------|-----------|---------------|-----------|------------|------------|---------------|
| C12/15 | 12,00 | | 72,71 | 59,36 | 58,53 | | 6,93 | 65,47 |
| C16/20 | 16,00 | | 72,02 | 61,41 | 61,47 | | 7,98 | 69,45 |
| C20/25 | 20,00 | 73,03 | 73,03 | 64,22 | 64,62 | 8,81 | 8,81 | 73,43 |
| C25/30 | 25,00 | 76,69 | 76,69 | 67,15 | 68,86 | 9,54 | 9,54 | 78,40 |
| C30/37 | 30,00 | 83,01 | 83,01 | 73,08 | 73,42 | 9,93 | 9,93 | 83,35 |
| C35/45 | 35,00 | | 91,99 | 79,93 | 78,31 | | 9,98 | 88,29 |
| C40/50 | 40,00 | | 103,63 | 84,25 | 83,53 | | 9,69 | 93,22 |
| C45/55 | 45,00 | | 117,93 | 89,22 | 89,09 | | 9,06 | 98,15 |
| C50/60 | 50,00 | | 134,89 | 94,18 | 94,97 | | 8,09 | 103,06 |
| C55/67 | 55,00 | | 154,51 | | 101,18 | | 6,78 | 107,96 |
| C60/75 | 60,00 | | 176,79 | | 107,72 | | 5,13 | 112,85 |
| C70/85 | 70,00 | | 229,33 | | 121,79 | | 0,81 | 122,60 |
| C80/90 | 80,00 | | 292,51 | | 137,18 | | -4,87 | 132,31 |
| C90/105 | 90,00 | | 366,33 | | 153,89 | | -11,91 | 141,98 |

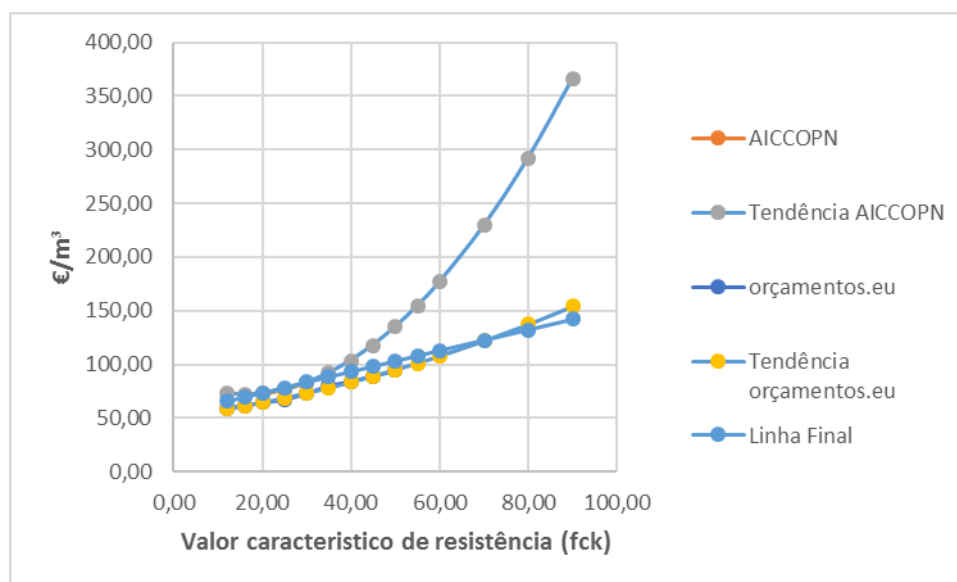


Figura 4.21 – Linhas de variação de custo por metro cúbico de betão em função da sua classe

Para estimar o valor da diferença entre os custos de ambas as fontes optou-se por criar uma linha de tendência em função dos valores conhecidos em vez de utilizar as linhas de tendência finais de cada fonte. Isto é feito porque se se utilizassem os valores das linhas de tendência para determinação do custo final obter-se-iam quantias excessivas para as classes de resistência mais altas. A estimativa final resulta da soma do valor de Δf com o valor da linha de tendência obtida a partir dos custos da página *orçamentos.eu*.

O valor final alcançado parece estar mais próximo do que pode ser um valor real para o custo associado às respetivas classes de betão.

Tabela 4.3 – Resultados de quantificação e orçamentação para o caso de estudo 1

| Elemento | Betão (m ³) | Custo (€) | Cofragem (m ²) | Custo (€) | Aço (kg) | Custo (€) |
|----------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Vigas | 3,60 m ³ | 264,35 € | 31,20 m ² | 624,00 € | 166,81 kg | 119,38 € |
| Pilares | 2,16 m ³ | 158,60 € | 28,80 m ² | 576,00 € | 565,75 kg | 392,44 € |
| Lajes | 9,00 m ³ | 705,56 € | 36,00 m ² | 720,00 € | 630,27 kg | 439,18 € |
| Σ | 14,76 m³ | 1128,51 € | 96,00 m² | 1920,00 € | 1362,83 kg | 951,00 € |

Convém referir que estes são custos associados aos materiais e que não estão contabilizados os custos de execução e mão-de-obra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O estado atual dos programas aplicados no terceiro capítulo – e fazendo uma ligação com o se encontra descrito no Estado da Arte – cumpre parcialmente com o que é descrito em termos de interoperabilidade e funcionalidades de modelação de armaduras desejáveis. É verdade que ainda existem limitações e algumas falhas, mas comparativamente ao que eram os programas de modelação há dois ou três anos atrás verificamos uma constante evolução dos mesmos, com novas funcionalidades a surgirem de ano para ano e os problemas a serem resolvidos com cada nova edição do *software*.

Vendo o que é hoje alcançado com o Robot Structural Analysis – e usando o PAC-Pórticos como uma leve comparação da evolução da área – vemos que já existe uma discrepância positiva tanto a nível de apresentação e controlo intuitivo como a nível de modelação e opções de cálculo disponíveis, ainda que algumas funções do aplicativo mais antigo fossem uma mais valia para o *software* atual. Os módulos de cálculo e de interoperabilidade, assim como as opções de personalização de soluções em elementos de betão armado são funcionalidades que necessitam de ser aperfeiçoadas, mas as versões atuais já são uma excelente adição e ajudam a simplificar a realização de um projeto.

Na modelação de armaduras sem implicações de cálculo, os programas Tekla Structures e Revit apresentam capacidades que permitem modelar armaduras em qualquer peça e personalizar qualquer solução ou pormenor que seja necessário em projeto. Com maior ou menor dificuldade ou consumo de tempo, as ferramentas atuais já dão liberdade suficiente para gerar soluções com um grau de complexidade elevado, mesmo com a possibilidade de sobreposição de elementos nos nós estruturais. Este é um problema que muito dificilmente será resolvido, visto que está sempre dependente do resultado que o modelador pretende alcançar, mas que não afeta a qualidade nem os propósitos da modelação destes elementos. A produção de desenhos e de documentos de medição, seja para fabricação, para projeto ou obra, já possui um nível de qualidade bastante bom e a criação de vistas dos modelos a partir da definição de *Assemblies* facilita imenso o processo de montagem dos *layouts* dos desenhos técnicos em Revit. O Tekla também possui essa agilidade, mas podia tentar tornar o processo de definição de *templates* mais intuitivo. A interoperabilidade é um ponto que tem vindo a melhorar de

forma significativa, seja ela por IFC ou noutro formato de partilha e nos próximos anos deve atingir um nível próximo da perfeição.

O Advance Concrete possui ferramentas interessantes, mas a sua utilização por vezes faz-se sentir como um retrocesso à evolução do paradigma BIM. As falhas e alterações constantes de interoperabilidade e impossibilidade de integrar de forma convincente o modelo de armaduras num modelo Revit são limitações com enorme impacto. Apesar de apresentar técnicas para criação dinâmica de desenhos de armaduras e ferramentas de modelação estrutural interessantes, o programa acaba por ficar aquém do desejado, mas demonstra potencial e pode ser que evolua significativamente nas próximas versões do *software*

A programação de ferramentas próprias, seja esta numa linguagem mais simples ou noutra mais complexa, vai ter sempre um grau de dificuldade associado um pouco elevado, isto se o programador quiser alcançar um nível de cálculo ou de modelação com qualidade para competir com as ofertas atuais dos *softwares* testados. As ferramentas desenvolvidas nesta dissertação apresentam-se com resultados de relativa simplicidade, mas que ajudaram a perceber a complexidade da criação e programação para cálculo e modelação de armaduras. A criação do mais simples elemento pode estar sujeita a dezenas de variáveis, seja a nível de verificação de segurança estrutural ou a nível de criação de dados para modelação, com parâmetros relativos à classe de betão e aço, posicionamento na secção, seja ela longitudinal ou transversal, diâmetro, etc. Todos estes parâmetros têm de ser considerados e mesmo na secção mais simples do tipo retangular, como foi o caso dos exemplos criados, a dificuldade de programar algo que responda a qualquer situação pode ser complexa de concretizar. Os exemplos criados já são capazes de responder a algumas situações mais básicas, mas a sua utilidade terá que ser categorizada como um elemento de apoio ao estudo prévio ou conceção para uma fase inicial de projeto, onde se pretenda alcançar um valor generalizado do custo de obra ou um conjunto de dados que apoiem a viabilidade de prosseguir com um dado empreendimento ou solução estrutural.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Esta dissertação tenta criar uma visão global das ferramentas e aplicativos para uma área muito específica, mas que acaba por ter bastante conteúdo. Não foi possível estudar a possibilidade de criação de um modelo BIM 4D das estruturas e das suas soluções, tanto por falta de tempo como por falta de um caso de estudo próprio para o efeito. Centrou-se, por isso, as atenções no 3D e em alguns pormenores que se enquadram com o 5D (a orçamentação de materiais) e apesar de os resultados alcançados serem por si bastantes proveitosos, estes não foram diretamente aplicados a um exemplo que pudesse dar retorno, ou seja, não houve forma de validar os resultados finais do empreendimento real do segundo caso de estudo. Esta será a primeira a parte que deve ser desenvolvida; testar e relatar os resultados aplicados a um acompanhamento real de uma obra será o próximo passo para a validação deste tipo de tecnologia.

O próximo objetivo está ligado à modelação e à criação de ferramentas para os elementos construtivos existentes. O que foi aqui desenvolvido, representa em baixa escala o que é possível atingir com estas ferramentas, mas a verdade é que ainda existe uma grande limitação nas ferramentas para a automatização de soluções de armaduras. O valor limitado de secções aptas para uma automatização da modelação é algo que pode ser eliminado, talvez numa abordagem mais simplista, sem a tentativa de procurar criar uma ferramenta que modele todos os elementos de uma só vez, seguindo pelo caminho que aparenta ter uma maior versatilidade, ou seja, optar pela solução elemento a elemento, ainda que possa ser mais lenta na sua aplicação. Desta forma, o modelador pode ter soluções genéricas para os diversos tipos de secção que vão surgindo ao longo dos seus projetos, ficando essas ferramentas para a posterioridade da empresa. Esta opção será mais rápida de programar e os resultados poderão ser alcançados de forma expedita.

Para finalizar, o BIM veio para ficar e já existe uma aposta na formação na metodologia e nos aplicativos existentes por parte das instituições académicas nacionais. Esta aposta deve ser mantida porque não existe um gabinete de engenharia que atualmente não procure colaboradores com formação na área do BIM, seja ela para uso intensivo da metodologia e de todas as capacidades inerentes ou somente de um dado *software* que se encontra enraizado na cultura de trabalho das empresas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CACHIM, Paulo ; MORAIS, Miguel – **Estruturas de Betão : Bases de Cálculo**. Porto : Publindústria, 2013 282 p. ISBN 978-989-723-040-0
2. LIMA, J. d'Arga – **Betão Armado: Armaduras, Aspectos Gerais**. Lisboa : LNEC, 1988. 244 p. ISBN: 9789724900339
3. BEEBY, A. W. ; NARAYANAN, R. S. - **DESIGNERS' GUIDE TO EUROCODE 2: DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES**. Londres : Thomas Telford Publishing, 2009. 230 p. ISBN: 978-0-7277-3150-0
4. JOINT RESEARCH CENTRE - **EUROCODE 2: BACKGROUND & APPLICATIONS DESIGN OF CONCRETE BUILDINGS**. Itália : Publications Office of the European Union, 2014 ISBN 978-92-79-36548-5
5. **MANUAL FOR DESIGN AND DETAILING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO THE CODE OF PRACTICE FOR STRUCTURAL USE OF CONCRETE 2013**. 2013
6. The Institution of Structural Engineers - **Standard Method of Detailing Structural Concrete : A manual for best practice**. 3ª Edição. Londres : The Institution of Structural Engineers, 2006 ISBN 0 901297 41 0 978 0 901297 41 9
7. BANGASH, M. Y. H. - **Structural Detailing in Concrete : A comparative study of British, European and American codes and practices**. 2ª Edição. Londres : Thomas Telford Publishing, 2003 ISBN 0 7277 3034 7
8. **Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado**. Portugal : Porto Editora, 2010 ISBN 978-972-0-06806-4
9. NP EN 1992-1-1 2010, Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão : Parte 1-1 : Regras gerais e regras para edifícios. Portugal : LNEC. 259 p.
10. SOUSA, Raúl Filipe - Adaptação do programa PAC-Pórticos ao EC2 e sua integração com o conceito BIM. [Texto policopiado] Porto : [s.n.], 2015. Tese de Mestrado
11. ALMEIDA, Marco Romeu - Tecnologia BIM aplicada ao Projeto de Estruturas Metálicas. [Texto policopiado] Porto : [s.n.], 2015. Tese de Mestrado

12. MAGALHÃES, Marcelo Moreira – Projeto de estruturas de edifícios em betão armado apoiado em ferramentas BIM. [Texto policopiado] Porto : [s.n.], 2015. Tese de Mestrado
13. RIBEIRO, Bruno - Aplicação de metodologias BIM no contexto da construção da nova ponte sobre o Rio Dão. [Texto policopiado] Guimarães : [s.n.], 2015. Tese de Mestrado
14. GONÇALVES, Ismael Filipe do Vale – APLICAÇÃO DO BIM AO PROJETO DE ESTRUTURAS [Texto policopiado] : ABORDAGEM DE PROGRAMAÇÃO AO PROCESSO DE PORMENORIZAÇÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO. Viana do Castelo : [s.n.], 2014. Tese de Mestrado
15. RIBEIRO, Cátia Aidé - DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS CAD/CAM PARA A PORMENORIZAÇÃO E PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE ARMADURAS PARA ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO. [Texto policopiado] Porto : [s.n.], 2013. Tese de Mestrado
16. FERNANDES, José Pedro - A metodologia Building Information Modeling aplicada ao projeto de estruturas. [Texto policopiado] Guimarães : [s.n.], 2013. Tese de Mestrado
17. SOUSA, Hugo Daniel Cortês de – Modelação em BIM de armaduras de betão armado de um edifício [Texto policopiado] : Análise da sua contribuição para processos de medição e orçamentação mais eficientes. Guimarães : [s.n.], 2013. Tese de Mestrado
18. DAHLGREN, Anneli ; SVENSSON, Louise - Guidelines and Rules for Detailing of Reinforcement in Concrete Structures : A Compilation and Evaluation of Ambiguities in Eurocode 2. [Texto policopiado] Gotemburgo : [s.n.], 2013. Tese de Mestrado
19. JOHANSSON, Magnus ; JONASSON, Emil – Potential improvements of the reinforcement process by implementation of BIM [Texto policopiado]. Gotemburgo : [s.n.], 2011. Tese de Mestrado
20. PICÓ, Eloi Coloma – TECNOLOGIA BIM PER AL DISSENY ARQUITECTÒNIC [Texto policopiado]. Catalunha : [s.n.], 2010. Tese de Mestrado
21. PNIEWSKI, Voytek - Building Information Modeling (BIM) Interoperability Issues : in Light of Interdisciplinary Collaboration. 3ª Edição. Londres : Collaborative Modeling Ltd., 2011. Tese de Mestrado
22. TABORDA, Paulo ; CACHADINHA, Nuno - BIM NAS OBRAS PÚBLICAS EM PORTUGAL : CONDICIONANTES PARA UMA IMPLEMENTAÇÃO COM SUCESSO [PDF]. Disponível em <http://run.unl.pt/bitstream/10362/10012/1/ID21.pdf>
23. BERG, Heidi - Experiences with BIM for infrastructure implementation Measured value of today's level : possibilities with future levels of BIM [PDF]. Disponível em http://novarc.ee/wp-content/uploads/konverents/Heidi_Berg_Vianova_NOVARC_Tallinn_02.10.14.pdf

24. SPALDING, Carl ; PAIS, Joseph – Take advantage of BIM for reinforced concrete structures [PDF]. Disponível em <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2014/revit-for-structural-engineers/se6512#chapter=0>
25. Lloyd's Register - Building information modelling (BIM) [HTML]. Disponível em <http://www.lr.org/en/energy/utilities-and-building-assurance-schemes/building-information-modelling/>
26. BOUYGUES CONSTRUCTION – Building Before Building : The BIM Revolution [HTML]. Disponível em <http://www.bimgeneration.com/english/#home>
27. 3D PERSPECTIVES - What is BIM Level 3? [HTML]. Disponível em <http://perspectives.3ds.com/architecture-engineering-construction/what-is-bim-level-3/>
28. Objectif BIM - BIM 2D 3D 4D 5D 6D 7D XD [HTML]. Disponível em <http://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/bim-2d-3d-4d-5d-6d-7d-xd>
29. Pratical BIM - What is this thing called LOD [HTML]. Disponível em <http://practicalbim.blogspot.pt/2013/03/what-is-this-thing-called-lod.html>
30. **Evolve**consultancy – LOD=LOD+LOI [HTML]. Disponível em <http://www.evolve-consultancy.com/resource/bim-brief/lo-d-lod-loi>
31. **Evolve**consultancy – BIM COLLABORATION FORMATS [HTML]. Disponível em <http://www.evolve-consultancy.com/resource/bim-brief/bim-collaboration-formats>
32. Construction21 INTERNATIONAL - European BIM or Europe of BIM? [HTML]. Disponível em <http://www.construction21.org/articles/fr/european-bim-or-europe-of-bim.html>
33. Between the Poles - Widespread adoption of BIM by national governments [HTML]. Disponível em <http://geospatial.blogs.com/geospatial/2013/07/widespread-adoption-of-bim-by-national-governments.html>
34. AIAKnowledgeNet - BIM, Standards & Interoperability [HTML]. Disponível em <http://network.aia.org/technologyinarchitecturalpractice/home/bimstandards>
35. civil + structural ENGINEER - Modeling reinforced concrete designs [HTML]. Disponível em <http://cenews.com/article/10087>
36. PAIXÃO, Luciana - AutoCAD: Desenhando em 3D | Modelagem Arquitetônica [HTML]. Disponível em <http://www.aarquiteta.com.br/blog/autocad/autoca3d/>
37. [open]BIMer - BCF. BIM Collaboration Format Explained [HTML]. Disponível em <http://openbimer.com/?p=286>

38. Sturdy structural – Top 5 Structural Design and Analysis Software That Get the Work Done! [HTML]. Disponível em <http://www.sturdystructural.com/blog/top-5-structural-design-and-analysis-software-that-get-the-work-done>
39. Help Center – Sharing the BIM Model: IFC [HTML]. Disponível em <http://helpcenter.graphisoft.com/guides/archicad-18-collaboration-guide/interoperability/sharing-the-bim-model-ifc/>
40. Echotech – Application Interoperability [HTML]. Disponível em <http://ecotechitsolutions.com/enterprises/application-interoperability/>
41. Arch2O – Case Study: BIM implementation in Shanghai Tower [HTML]. Disponível em <http://www.arch2o.com/case-study-bim-implementation-in-shanghai-tower/>
42. G2 Crowd – Best Building Design and BIM [HTML]. Disponível em <https://www.g2crowd.com/categories/building-design-and-building-information-modeling-bim>
43. TheBIMhub – How BIM enhance the risk management and mitigation of risk [HTML]. Disponível em <https://thebimhub.com/2015/09/26/how-bim-enhance-the-risk-management-and-mitigation/#.VuFlzZyLTIV>
44. ARANDA-MENA, Guilherme ; WAKEFIELD, Ron - INTEROPERABILITY OF BUILDING INFORMATION: MYTHOR REALITY? [PDF]. Australia : [s.n.]. Disponível em <http://mams.rmit.edu.au/lrssi7jid7nd4.pdf>
45. LUMION BLOG – Interview with Montana Consulting and Design about BIM [HTML]. Disponível em <https://lumion3d.com/blog.html?post=140272136860>
46. BIM 6D – Serviços [HTML]. Disponível em <http://bim6d.es/servicios/>
47. Interesting Engineering – What does a Civil Engineer Do? [HTML]. Disponível em <http://interestingengineering.com/what-a-civil-engineer-does/>
48. Designing Buildings Wiki – BIM collaboration format BCF [HTML]. Disponível em http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/BIM_collaboration_format_BCF
49. KAMARDEEN, Imriyas – 8D BIM MODELLING TOOL FOR ACCIDENT PREVENTION THROUGH DESIGN [PDF]. Disponível em http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2010-0281-0289_Kamardeen.pdf
50. FERNANDES, João – ANÁLISE SÍSMICA DA ESTRUTURA DE UM EDIFÍCIO : Metodologias preconizadas na NP EN 1998-1 (2010) [Texto policopiado] Porto : [s.n.], 2016. Trabalho Prático de DINES

51. CASTRO, Luís - **Método dos elementos finitos: Análise de pórticos planos**. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2009
52. VERMEULEN, Dieter - Rebar modelling in Revit with Dynamo for blended shapes [HTML]. Disponível em <https://revitbeyondbim.wordpress.com/2015/10/09/rebar-modelling-in-revit-with-dynamo-blended-shapes/>
53. PESOS ESPECÍFICOS DE MATERIAIS [PDF]. Disponível em http://www.prodetec.com.br/downloads/pesos_especificos.pdf
54. NP EM 1991-1-1 2009, Eurocódigo 1 – Acções em estruturas: Parte 1-1 : Acções gerais, pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios. Portugal : LNEC. 47 p.
55. SANTOS, Carlos; MATIAS, Luís – **COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE ELEMENTOS DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS**. Lisboa : LNEC, 2006
56. GAWEDA, Rafal – useful addins for Robot (API) [HTML]. Disponível em <http://forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis/useful-addins-for-robot-api/td-p/3899448>
57. RODRIGUES, Carlos – **Inspeção e Reforço de Estruturas, Mestrado em Engenharia Civil|Estruturas**. Porto: ISEP, 2014. Apontamentos Teóricos

ANEXO I – CASO DE ESTUDO 2

Notas:

- Nos dados para cálculo são apresentados valores e resultados para cálculo do edifício principal (zona administrativa). A justificação para tal decisão deve-se ao facto de se tratar de uma verificação de segurança ao projeto final. Verificada a segurança da estrutura administrativa não existiu a necessidade de verificar a situação do anfiteatro, até porque o mesmo não possui a tipologia construtiva abordada na dissertação e a ligação entre o edifício administrativo e a zona de conferências é realizada por um apoio simples, a consideração de uma ligação rígida entre os dois edifícios não seria correto, entenda-se esta rigidez como o encastramento que a ligação entre painéis criaria.
- Não é verificada a segurança das fundações

Materiais

Betão – NP-EN 206-1:

- C25/30 - XC2(P) - C10,40 - D_{\max} 20 - S3

Aço para armaduras:

- A 400 NRSD

Recobrimento de armaduras

- Lajes e paredes = 3 cm
- Vigas e pilares = 3.5 cm

Ações

Permanentes

Betão Armado $\approx 25 \text{ kN/m}^3$

Paredes Exteriores

- Alvenaria Tipo 1

Tabela I.1 – Composição por camadas – Alvenaria Tipo 1

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | $\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$ | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|-----------|---------------|----------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 2 | 0,42 |
| 2 | BLOCOS | ALVENARIA | TIJOLO FURADO | 14 | 15 | 2,1 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 2 | 0,42 |

- Espessura = 0.19 m
- Pé direito $\approx 2.60 \text{ m}$
- Carga Laminar (s/aberturas) $\approx 7.60 \text{ kN/m}$
- Alvenaria Tipo 2 (Envidraçado)
 - Espessura = 0.014 m
 - Pé direito $\approx 2.25 \text{ m}$
 - Carga Laminar (s/aberturas) $\approx 1.30 \text{ kN/m}$

Paredes Interiores (Divisórias)

Tabela I.2 – Composição por camadas – Divisórias

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|-----------|---------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,5 | 0,315 |
| 2 | BLOCOS | ALVENARIA | TIJOLO FURADO | 14 | 11 | 1,54 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,5 | 0,315 |

- Espessura \approx 0.15 m
- Pé direito \approx 3.50 m
- Carga laminar (s/aberturas) \approx 7.50 kN/m \rightarrow Carga Distribuída \approx 2.25 kN/m² (RSAEEP art.15º)

Escadas

Tabela I.3 – Composição por camadas – Escadas

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|-------|---------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | ARMADO | 25 | 20,00 | - |
| 2 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | LEVE | 13 | 3,00 | 0,26 |
| 3 | ROCHOSO | ROCHA | MÁRMORE | 28 | 2,00 | 0,56 |

- Espessura total da Laje = 0.25 m
- Dimensão do espelho do degrau = 0.19 m
- Carga Distribuída \approx 3.10 kN/m²

Piso intermédio

Tabela I.4 – Composição por camadas – Piso Intermédio

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|------------|-------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ESTUQUE | GESSO CARTONADO | 10 | 1,25 | 0,125 |
| 2 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ISOLAMENTO | LÃ DE ROCHA/VIDRO | 0,8 | 5,25 | 0,042 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,50 | 0,315 |
| 4 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | ARMADO | 25 | 22,00 | 0 |
| 5 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | LEVE | 13 | 6,00 | 0,78 |
| 6 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 2,00 | 0,42 |
| 7 | ROCHOSO | ROCHA | MÁRMORE | 28 | 2,00 | 0,56 |

- Espessura total da Laje = 0.40 m
- Carga Distribuída \approx 2.25 kN/m²

Cobertura

Tabela I.5 – Composição por camadas – Cobertura

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|------------|-------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ESTUQUE | GESSO CARTONADO | 10 | 1,5 | 0,15 |
| 2 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ISOLAMENTO | LÃ DE ROCHA/VIDRO | 0,8 | 5 | 0,04 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,5 | 0,315 |
| 4 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | ARMADO | 25 | 0 | 0 |
| 5 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ISOLAMENTO | EPS | 0,3 | 8 | 0,024 |
| 6 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | LEVE | 13 | 11,5 | 1,495 |
| 7 | DIVERSO | DIVERSOS | ASFALTO | 20 | 0,5 | 0,1 |
| 8 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | BETONILHA | 20 | 3 | 0,6 |

- Espessura média da Laje (s/caixa de ar) = 0.31 m
- Carga Distribuída ≈ 2.75 kN/m²

Varandas

Tabela I.6 – Composição por camadas – Varandas

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|------------|---------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,5 | 0,315 |
| 2 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | ARMADO | 25 | 15 | 0 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ISOLAMENTO | EPS | 0,3 | 4 | 0,012 |
| 4 | DIVERSO | DIVERSOS | ASFALTO | 20 | 0,5 | 0,1 |
| 5 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | LEVE | 13 | 1,5 | 0,195 |
| 6 | ROCHOSO | ROCHA | MÁRMORE | 28 | 2 | 0,56 |

- Espessura média da Laje (s/caixa de ar) = 0.245 m
- Carga Distribuída ≈ 1.20 kN/m²

Palas

Tabela I.7 – Composição por camadas – Palas

| CAMADA | MATERIAL | TIPO | ESPECIFICAÇÃO | γ (kN/m ³) | ESPESSURA (cm) | Carga (kN/m ²) |
|--------|----------------------------------|------------|---------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ARGAMASSA | CIMENTO/AREIA | 21 | 1,5 | 0,315 |
| 2 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | BETÃO | ARMADO | 25 | 15 | 0 |
| 3 | REVESTIMENTOS_ISOLAMENTOS_BETÕES | ISOLAMENTO | EPS | 0,3 | 4 | 0,012 |
| 4 | DIVERSO | DIVERSOS | ASFALTO | 20 | 0,5 | 0,1 |

- Espessura média da Laje (s/caixa de ar) = 0.21 m
- Carga Distribuída ≈ 0.43 kN/m²

Sobrecargas**Utilização**

Tabela I.8 – Sobrecargas de utilização por zona de aplicação

| SUPERFÍCIE | CATEGORIA | DESCRIÇÃO | q_k (Kn/m ²) | Q_k (kN) |
|------------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
| INTERIOR | C2 | LOCAL DE REUNIÃO C/ ASSENTOS FIXOS | 4 | 4 |
| COBERTURA | H | COBERTURAS Ñ ACESSÍVEIS (MANUTENÇÃO) | 0,4 | 1 |
| VARANDAS | C2 | LOCAL DE REUNIÃO C/ ASSENTOS FIXOS | 5 (L=1m), IGUAL AO ADJACENTE (L=(l - 1) m) | 4 |
| PALAS | H | COBERTURAS Ñ ACESSÍVEIS (MANUTENÇÃO) | 0,4 | 1 |
| ESCADAS | C2 | LOCAL DE REUNIÃO C/ ASSENTOS FIXOS | 4 | 4 |

Como o acesso ao anfiteatro é feito pelo edifício administrativo a sobrecarga de utilização considerada foi de 4 kN/m², isto foi aplicado em função da recomendação presente na norma aplicável.

NOTA: EC1-1-1 3.3.1(1)P: Para áreas submetidas a diferentes categorias de carga, o projeto deve considerar o caso de carga mais crítico.

Vento

- Zona A
- Categoria de terreno II
- Altura acima do solo \approx 7.60 m

Tabela I.9 – Dados e resultados para determinação da pressão dinâmica de pico

| | | | | | |
|-----------|--------|-----------|---|--------------|---|
| $V_{b,0}$ | 27 m/s | C_{dir} | 1 | C_{season} | 1 |
|-----------|--------|-----------|---|--------------|---|

| | | | |
|----------|--------|------------|------------------------|
| V_b | 27 m/s | K_I | 1 |
| $k_r(z)$ | 0,190 | σ_v | 5,13 |
| $c_r(z)$ | 0,955 | I_v | 0,199 |
| $c_o(z)$ | 1 | ρ | 1,25 kg/m ³ |
| V_m | 26 m/s | | |

| | | | | | |
|-------|------------------------|----------|------------------------|----------|------|
| q_b | 0,46 kN/m ² | $q_p(z)$ | 0,99 kN/m ² | $c_e(z)$ | 2,18 |
|-------|------------------------|----------|------------------------|----------|------|

Expressões de cálculo do EC1-1-4, da equação (4.1) à (4.10). Valor da velocidade básica de referência retirado do Quadro NA.I do EC1-1-4.

Direção YY

Tabela I.10 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão nas fachadas

| | |
|-----|---------|
| h | 7,60 m |
| b | 39,84 m |
| d | 11,80 m |
| h/b | 0,19 |
| h/d | 0,64 |
| e | 15 m |

- $h \leq b$
- $0,25 < h/d \leq 1$
- $e \geq d$

Fachadas

Tabela I.11 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais

| Área do Painel | COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERIOR | | | | |
|----------------------------------------|----------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$ | ZONA | | | | |
| 10,00 m ² | A | B | C | D | E |
| C _{pe} | -1,20 | -0,80 | -0,50 | 0,80 | -0,41 |
| Largura de faixa de aplicação da carga | 3,04 m | 8,76 m | 0,00 m | 39,84 m | 39,84 m |
| | 11,80 m | | 0,00 m | | |
| | 11,80 m | | | | |

Tabela I.12 – Pressão exercida pelo vento sobre as fachadas

| w _e (kN/m ²) | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|------|-------|
| A | B | C | D | E |
| -1,19 | -0,79 | -0,50 | 0,79 | -0,40 |

Cobertura

- Cobertura em terraço com platibanda.

Tabela I.13 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão na cobertura

| | |
|-------------------|--------|
| h | 7,60 m |
| h _p | 0,25 m |
| h _p /h | 0,033 |
| e | 15 m |

Tabela I.14 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais

| Área do Painel | COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERIOR PARA COBERTURAS EM TERRAÇO (C_{pe}) | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------|
| $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$ | ZONA | | | |
| $10,00 \text{ m}^2$ | F | G | H | I |
| C/PLATIBANDA (hp/h) | -1,54 | -1,04 | -0,70 | 0,2 |
| 0,033 | | | | -0,2 |

Tabela I.15 – Pressão exercida pelo vento sobre a cobertura

| $w_e \text{ (kN/m}^2\text{)}$ | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|------|------------------------|-------------|------------------------|----------|------------------------|---------|
| ZONA | | | | | | | | |
| $q_p(z)$ | F | | G | | H | | I | |
| $0,99 \text{ kN/m}^2$ | $-1,53 \text{ kN/m}^2$ | | $-1,03 \text{ kN/m}^2$ | | $-0,70 \text{ kN/m}^2$ | | $0,20 \text{ kN/m}^2$ | |
| | | | | | | | $-0,20 \text{ kN/m}^2$ | |
| b | 3,80 m | e/4 | 32,24 m | $b-2*(e/4)$ | 39,84 m | b | 39,84 m | b |
| d | 1,52 m | e/10 | 1,52 m | e/10 | 6,08 m | e/2-e/10 | 4,20 m | d-(e/2) |

Direção XX

Tabela I.16 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão nas fachadas

| | |
|-----|---------|
| h | 7,60 m |
| b | 11,80 m |
| d | 39,40 m |
| h/b | 0,64 |
| h/d | 0,19 |
| e | 11,80 m |

- $h \leq b$
- $h/d \leq 0,25$
- $e < d$

Tabela I.17 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais

| Área do Painel | COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERIOR | | | | |
|----------------------------------------|----------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| 1 m² < A < 10 m² | ZONA | | | | |
| 10,00 m² | A | B | C | D | E |
| C _{pe} | -1,20 | -0,80 | -0,50 | 0,80 | -0,30 |
| Largura de faixa de aplicação da carga | 2,36 m | 9,44 m | 27,60 m | 11,80 m | 11,80 m |
| | 11,80 m | | 27,60 m | | |
| | 39,40 m | | | | |

Tabela I.18 – Pressão exercida pelo vento sobre as fachadas

| w_e (kN/m ²) | | | | |
|----------------------------|-------|-------|------|-------|
| A | B | C | D | E |
| -1,19 | -0,79 | -0,50 | 0,79 | -0,30 |

Cobertura

- Cobertura em terraço com platibanda.

Tabela I.19 – Dados para definição das faixas de referência – Cálculo da pressão na cobertura

| | |
|------|---------|
| h | 7,60 m |
| hp | 0,25 m |
| hp/h | 0,033 |
| e | 11,80 m |

Tabela I.20 – Coeficientes de pressão exterior – Resultados finais

| Área do Painei | COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERIOR PARA COBERTURAS EM TERRAÇO (C_{pe}) | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------|
| $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$ | ZONA | | | |
| 10,00 m ² | F | G | H | I |
| C/PLATIBANDA (hp/h) | -1,54 | -1,04 | -0,70 | 0,2 |
| 0,033 | | | | -0,2 |

Tabela I.21 – Pressão exercida pelo vento sobre a cobertura

| w_e (kN/m ²) | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------|------|-------------------------|-----------|-------------------------|----------|-------------------------|---------|
| ZONA | | | | | | | | |
| $q_p(z)$ | F | | G | | H | | I | |
| 0,99 kN/m ² | -1,53 kN/m ² | | -1,03 kN/m ² | | -0,70 kN/m ² | | 0,20 kN/m ² | |
| | | | | | | | -0,20 kN/m ² | |
| b | 2,95 m | e/4 | 5,90 m | b-2*(e/4) | 11,80 m | b | 11,80 m | b |
| d | 1,18 m | e/10 | 1,18 m | e/10 | 4,72 m | e/2-e/10 | 33,50 m | d-(e/2) |

Combinações

Combinações geradas em Robot Structural Analysis 2017 seguindo a NP EN1990:2009.

Tabela I.22 – Casos de carga aplicados

| Load Case | Case Name | Nature | Analysis type |
|-----------|-----------|------------|-----------------|
| 1 | PP | Structural | Static - Linear |
| 2 | RCP dist. | Structural | Static - Linear |
| 3 | RCP conc. | Structural | Static - Linear |
| 4 | Sb. C | live | Static - Linear |
| 5 | Sb. H | live | Static - Linear |
| 6 | Wind X++ | wind | Static - Linear |
| 7 | Wind X+- | wind | Static - Linear |
| 8 | Wind Y++ | wind | Static - Linear |
| 9 | Wind Y+- | wind | Static - Linear |
| 10 | Wind X-+ | wind | Static - Linear |
| 11 | Wind X-- | wind | Static - Linear |
| 12 | Wind Y-+ | wind | Static - Linear |
| 13 | Wind Y-- | wind | Static - Linear |

| | |
|-------|-----------------------------------------------|
| PP | Peso Próprio |
| RCP | Restantes Cargas Permanentes |
| Sb. C | Sobrecarga de utilização dos pisos interiores |
| Sb. H | Sobrecarga de utilização da cobertura |
| Wind | Vento |

Tabela I.23 – Combinações ULS

| | | | | | |
|-----|----|--------------------------------------------------------|-----|----|--------------------------------------------------------|
| ULS | 1 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50$ | ULS | 27 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 12*1.50$ |
| | 2 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 6*0.90$ | | 28 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 13*1.50$ |
| | 3 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 7*0.90$ | | 29 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 6*1.50$ |
| | 4 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 8*0.90$ | | 30 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 7*1.50$ |
| | 5 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 9*0.90$ | | 31 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 8*1.50$ |
| | 6 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 10*0.90$ | | 32 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 9*1.50$ |
| | 7 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 11*0.90$ | | 33 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 10*1.50$ |
| | 8 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 12*0.90$ | | 34 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 11*1.50$ |
| | 9 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.50 + 5*1.50 + 13*0.90$ | | 35 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 12*1.50$ |
| | 10 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35$ | | 36 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 13*1.50$ |
| | 11 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50$ | | 37 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 6*1.50$ |
| | 12 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 6*0.90$ | | 38 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 7*1.50$ |
| | 13 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 7*0.90$ | | 39 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 8*1.50$ |
| | 14 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 8*0.90$ | | 40 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 9*1.50$ |
| | 15 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 9*0.90$ | | 41 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 10*1.50$ |
| | 16 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 10*0.90$ | | 42 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 11*1.50$ |
| | 17 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 11*0.90$ | | 43 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 12*1.50$ |
| | 18 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 12*0.90$ | | 44 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.05 + 5*1.05 + 13*1.50$ |
| | 19 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.50 + 5*1.50 + 13*0.90$ | | 45 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 6*1.50$ |
| | 20 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$ | | 46 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 7*1.50$ |
| | 21 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 6*1.50$ | | 47 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 8*1.50$ |
| | 22 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 7*1.50$ | | 48 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 9*1.50$ |
| | 23 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 8*1.50$ | | 49 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 10*1.50$ |
| | 24 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 9*1.50$ | | 50 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 11*1.50$ |
| | 25 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 10*1.50$ | | 51 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 12*1.50$ |
| | 26 | $1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.35 + 4*1.05 + 5*1.05 + 11*1.50$ | | 52 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 13*1.50$ |

Tabela I.24 – Combinações SLS e RSA

| | | | | | |
|---------|----|--------------------------------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------|
| SLS:CHR | 53 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00$ | SLS:FRE | 79 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.50 + 5*0.50$ |
| | 54 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 6*0.60$ | | 80 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$ |
| | 55 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 7*0.60$ | | 81 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 6*0.20$ |
| | 56 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 8*0.60$ | | 82 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 7*0.20$ |
| | 57 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 9*0.60$ | | 83 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 8*0.20$ |
| | 58 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 10*0.60$ | | 84 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 9*0.20$ |
| | 59 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 11*0.60$ | | 85 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 10*0.20$ |
| | 60 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 12*0.60$ | | 86 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 11*0.20$ |
| | 61 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*1.00 + 5*1.00 + 13*0.60$ | | 87 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 12*0.20$ |
| | 62 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$ | | 88 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30 + 13*0.20$ |
| | 63 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 6*1.00$ | | 89 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 6*0.20$ |
| | 64 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 7*1.00$ | | 90 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 7*0.20$ |
| | 65 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 8*1.00$ | | 91 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 8*0.20$ |
| | 66 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 9*1.00$ | | 92 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 9*0.20$ |
| | 67 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 10*1.00$ | | 93 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 10*0.20$ |
| | 68 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 11*1.00$ | | 94 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 11*0.20$ |
| | 69 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 12*1.00$ | | 95 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 12*0.20$ |
| | 70 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.70 + 5*0.70 + 13*1.00$ | | 96 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 13*0.20$ |
| | 71 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 6*1.00$ | SLS:QPR | 97 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 4*0.30 + 5*0.30$ |
| | 72 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 7*1.00$ | | 98 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00$ |
| | 73 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 8*1.00$ | RSA | 99 | $1*1.50 + 2*1.50 + 3*1.50 + 4*1.50 + 5*1.50$ |
| | 74 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 9*1.00$ | | | |
| | 75 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 10*1.00$ | | | |
| | 76 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 11*1.00$ | | | |
| | 77 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 12*1.00$ | | | |
| | 78 | $1*1.00 + 2*1.00 + 3*1.00 + 13*1.00$ | | | |

Cálculo

Vigas

Parâmetros de cálculo considerados:

Classe de exposição – XC2; Classe Estrutural – S3; Classe de betão – C25/30; Classe de aço – A400;

Cálculo do coeficiente de fluência – Idade do betão - 28 e 365 dias (Primeiro carregamento e após execução da estrutura); Humidade Relativa – 45%;

Limites de deformação – Longo prazo – $l_{v\tilde{a}o}/250$ (≤ 2.5 cm); Instantânea – $l_{v\tilde{a}o}/500$ (≤ 2.5 cm);

Limite de abertura de fendas – 0.3 mm;

Recobrimento nominal – 3.5 cm; As (Área total de Armaduras Longitudinais); Asw (Área de Armaduras transversais aplicadas por metro)

Tabela I.25 – Relação entre armaduras longitudinais

| Id. | My máx (kN*m) | My mín (kN*m) | Mx máx. (kN*m) | As Ap. (cm ²) | As Soft. (cm ²) | FS Soft. | As Ap./As Soft. | FS Ap. (Exp.) |
|-----|------------------|------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| V1 | 38.11 | -77.49 | - | 16.08 | 16.08 | 2.00 (My mín) | 1 | ≈2 |
| V2 | 50.74 | -95.56 | - | 23.75 | 23.75 | 1.22 (*) ¹ | 1 | 1.22 |
| V3 | 69.47 | -68.54 | 28.16 | 14.78 | 20.30 | 6.40 (média) | 0.73 | ≈4.66 (*) ^{2,3} |
| V4 | 45.57 | -44.17 | 26.12 | 12.78 | 13.3 | 5.81 (média) | 0.96 | ≈5.43 (*) ^{2,3} |

Tabela I.26 - Soluções de Armadura Longitudinal

| Id. | Armadura Aplicada | | | Armadura Sugerida pelo <i>Software</i> | | |
|-----|-------------------|------------|------|----------------------------------------|------------|------------|
| | Topo | Intermédia | Base | Topo | Intermédia | Base |
| V1 | 4ø16 | - | 4ø16 | 4ø16 | - | 4ø16 |
| V2 | 4ø16 | - | 5ø20 | 4ø16 | - | 5ø20 |
| V3 | 3ø12 | 16ø8 | 3ø12 | 6ø12 (Ag.) | 18ø8 | 4ø12 (Ag.) |
| V4 | 3ø12 | 12ø8 | 3ø12 | 6ø12 (Ag.) | 4ø8 | 4ø12 (Ag.) |

Tabela I.27 – Relação entre armaduras transversais

| Id. | Fz máx (kN) | Arm. Ap. | Asw Ap. (cm ² /m) | Arm. Soft. | Asw Soft. (cm ² /m) | FS Soft. | Asw Ap./ Asw Soft. | FS Ap. (Exp.) |
|-----|-------------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------|--------------------|---------------|
| V1 | 78.21 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | 3.72 | 1 | 3.72 |
| V2 | 178.53 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | 1.34 | 1 | 1.34 |
| V3 | 140.39 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | ø8//0.20 2 ramos | 5.03 | 3.93 | 1.33 | 5.23 |
| V4 | 81.06 | ø8//0.15 2 ramos | 6.70 | ø8//0.20 2 ramos | 5.03 | 5.44 | 1.33 | 7.24 |

Aplicado (Ap.); *Software* (Soft.); Expectável (Exp.); Identificação (Id.); Agrupamento de varões (Ag.)

Torsão (Mx) – Vigas V3 e V4; Flexão Simples (My); Corte (Fz); Fator de Segurança (FS)

(*)¹ – Viga V2 – solução de armadura longitudinal inferior com um fator de segurança de 4,38, pode ser um sobredimensionamento, ou divergência entre resultados de flexão entre o modelo desta tese e o modelo de cálculo/processo de cálculo utilizado para o dimensionamento original.

(*)² – Viga V3 e V4 – Não foram reproduzidas as soluções aplicadas no *software* porque o mesmo não reconhecia parte dos elementos colocados de forma manual (os varões longitudinais de 8 mm de diâmetro foram colocados de forma manual sem recorrer à ferramenta *Typical Reinforcement* e talvez por essa razão não fossem reconhecidos pelo *software* no cálculo).

(*)³ – Viga V3 e V4 – Tanto as soluções aplicadas como as de cálculo não passam na verificação à torção, o *software* exibe um aviso dessa situação e após uma verificação adicional chegou-se à conclusão que seria necessário aplicar uma área de 21,34 e 19,74 cm² para a viga V3 e para a V4 respetivamente. Ainda assim o modelo de cálculo não tem em conta o apoio ao longo das laterais das palas sobre os pilares de maior dimensão o que acaba por reduzir substancialmente, senão eliminar por completo, o esforço de torsão na viga. Estas palas foram substituídas pelos efeitos da pala sobre a viga para ser mais simples a criação do modelo, a simplificação simula uma laje suportada ao longo de todo o desenvolvimento das vigas V3 e V4 e não contabiliza o suporte da laje sobre os pilares existentes. Para perceber as características do suporte das palas sobre os pilares é recomendada a consulta dos modelos 3D de armaduras relativo às vigas V3 e V4 e pilares P3 e P4 presentes neste anexo.

A segurança à deformação e à fendilhação é verificada em todos os elementos, as piores situações alcançam um valor de largura de fenda máximo de 0,2 mm e uma deformação a longo prazo de 0,2 cm.

Pilares

Parâmetros de cálculo considerados:

Classe de exposição – XC2; Classe Estrutural – S3; Classe de betão – C25/30; Classe de aço – A400;

Cálculo do coeficiente de fluência – Idade do betão - 28 e 365 dias (Primeiro carregamento e após execução da estrutura); Humidade Relativa – 45%;

Método de cálculo para pilares retangulares sujeitos a encurvadura biaxial baseado na distribuição de tensões;

Critério simplificado de para análise aos efeitos de segunda ordem baseado no cálculo de uma rigidez nominal considerando o módulo de elasticidade efetivo do betão;

Recobrimento nominal – 3.5 cm; As (Área total de Armaduras Longitudinais); Asw (Área de Armaduras transversais aplicadas por metro)

Coeficiente de encurvadura k utilizado correspondente à figura 5.7 g) do ponto 5.8.3.2 do EC2 ($l_0=l$)

Tabela I.28 – Relação entre armaduras longitudinais

| Id. | My (kN.m) | Mz (kN.m) | Fx (kN) | As Ap. (cm ²) | As Soft. (cm ²) | FS Soft. (*) ¹ | As Ap./As Soft. | FS Ap. (Exp.) |
|-----|--------------|--------------|---------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| P1 | 12.19 | 19.61 | 679.79 | 25.13 | 25.13 | 1.64 | 1 | 1.64 |
| P2 | 3.03 | 0.05 | 239. | 16.08 | 16.08 | 1.70 | 1 | 1.70 |
| P3 | 65.76 | 10.26 | 488.18 | 50.26 | 50.26 (*) ² | 7.11 | 1 | 7.11 |
| P4 | 37.67 | 0.63 | 183.55 | 9.05 | 15.08 | X (*) ³ | 1 | X |

Tabela I.29 – Relação entre armaduras transversais

| Id. | Fy máx (kN) | Fz máx (kN) | Asw Ap. (cm ² /m) | Asw Soft. (cm ² /m) | FS (*) ⁴ | Asw Ap. /Asw Soft. | FS Ap. (Exp.) |
|-----|----------------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| P1 | 18.66 | 6.55 | 3.77*2 | 3.77*2 | 6.29 | 1 | 6.29 |
| P2 | 0.08 | 1.73 | 3.77*2 | 3.77*2 | >10 | 1 | >10 |
| P3 | 11.58 | 36.83 | 3.77*2 | 3.77*2 (*) ² | >10 | 1 | >10 |
| P4 | 0.29 | 23.73 | 3.77*2 | 3.77*2 | >10 | 1 | >10 |

Aplicado (Ap.); Software (Soft.); Expectável (Exp.); Identificação (Id)

Carga de encurvadura (Fx); Flexão – 1ª Ordem (My e Mz); Corte (Fy e Fz); Fator de Segurança (FS)

(*)¹ – O fator de segurança apresentado refere-se ao menor fator alcançado na verificação dos diversos elementos de um mesmo tipo de secção, ou seja, o elemento mais condicionado do tipo P1, por exemplo, relativamente à carga de encurvadura é a barra 193 do modelo, mas não é a que possui os esforços máximos de flexão, esses valores ocorrem nas barras 205 e 189 para este tipo de secção. É importante referir que esta verificação não teve e conta efeitos sísmicos e por essa razão estes resultados acabam por ser meramente exemplificativos das capacidades de dimensionamento do programa.

(*)² – No pilar P3 não é possível modelar uma solução onde as cintas e os varões longitudinais estejam dispostos exatamente da mesma forma que a solução aplicada na construção. Ainda assim a solução aproximada diverge da real apenas no espaçamento entre a segunda e a penúltima linha de varões longitudinais da secção no sentido Z. A amarração por cintas está disposta de forma diferente, mas o número de ramos é o mesmo que na solução original. Sendo assim o fator de segurança real no que toca à flexão (M_y) deve ser superior ao que é alcançado neste modelo.

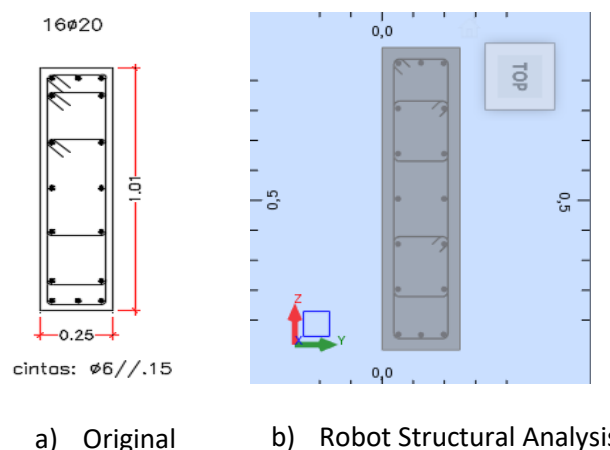


Figura I.1 – Comparação de solução de armaduras para o pilar P3

(*)³ – O pilar P4 não verifica a segurança, mas a resposta a esta “falha” deve-se ao facto de o modelo utilizado originalmente para o dimensionamento da estrutura não ter estes pilares inseridos. Estes foram inseridos por motivos estéticos e de arquitetura e não tem qualquer peso estrutural, a presença de armaduras justificasse para casos sísmicos para estes serem capazes de suportar movimentações horizontais e atribuir estabilidade a esses elementos. A introdução destes pilares neste modelo acaba por ser uma tentativa de verificar se a consideração dos mesmos seria benéfica para a estrutura, algo que não se verifica uma vez que este é um elemento demasiado esbelto e caso tivesse importância estrutural a sua geometria teria de ser alterada para ter uma solução de armadura mais económica.

(*)⁴ – Estes fatores de segurança, tal como na primeira tabela, não correspondem à realidade de projeto por não serem tidos em conta os esforços de origem sísmica. Existe ainda a particularidade de ter sido considerada uma disposição de armadura transversal no modelo até à viga, mas dada a dimensão das vigas V3 e V4, e dos próprios pilares, justificasse a continuidade das cintas até à laje. A verificação de

segurança foi por isso feita à parte do *software* e para os resultados correspondentes às extremidades dos pilares com ligação às lajes.

Lajes

Parâmetros de cálculo considerados:

Classe de exposição – XC2; Classe Estrutural – S3; Classe de betão – C25/30; Classe de aço – A400;

Cálculo do coeficiente de fluência – Idade do betão - 28 e 365 dias (Primeiro carregamento e após execução da estrutura); Humidade Relativa – 45%;

Limites de deformação – 2 cm;

Limite de abertura de fendas – 0.3 mm;

Recobrimento nominal – 3.0 cm; A_{sx} e A_{sy} (Área total de Armaduras Longitudinais paralelas ao sentido x e y, respetivamente);

Tabela I.30 – Verificação de segurança à flexão em lajes

| Id. | M_{xx}^- (kN.m/m) | As Ap. Inf. (cm ² /m) | As Req. Soft. Inf. (cm ² /m) | VS | M_{xx}^+ (kN.m/m) | As Ap. Sup. (cm ² /m) | As Req. Soft. Sup. (cm ² /m) | VS |
|-------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----|
| LM1 | 18.44 | 11.31 | 4.52 | OK | 31.58 | (11.31/7.54)/5.65 | (5.76)/5.63 | OK |
| LM2 | 0.47 | 11.31 | 0.12 | OK | 16.14 | 7.54 | 4.64 | OK |
| LM3 | 31.71 | 11.31 | 8.56 | OK | 31.78 | 7.54 | 8.63 | KO |
| LE1 | 11.14 | 5.24 | 4.52 | OK | 33.12 | 3.35 | 6.54 | KO |
| Palas | 6.42 | 3.35 | 4.52 | KO | 10.05 | 3.35 | 9.47 | KO |
| Id. | M_{yy}^- (kN.m/m) | As Ap. Inf. (cm ² /m) | As Req. Soft. Inf. (cm ² /m) | VS | M_{yy}^+ (kN.m/m) | As Ap. Sup. (cm ² /m) | As Req. Soft. Sup. (cm ² /m) | VS |
| LM1 | 30.46 | 11.31 | 6.05 | OK | 60.26 | (11.31/7.54)/5.65 | (12.44/8.83) /3.05 | KO |
| LM2 | 1.53 | 11.31 | 0.12 | OK | 17.57 | 7.54 | 4.64 | OK |
| LM3 | 13.19 | 11.31 | 4.52 | OK | 19.98 | 7.54 | 4.52 | OK |
| LE1 | 3.35 | 11.31 | 4.52 | OK | 49.49 | 5.24 | 11.73 | KO |
| Palas | 2.98 | 5.24 | 4.52 | OK | 22.42 | 11.31 | 11.83 | KO |

Aplicado (Ap.); *Software* (Soft.); Identificação (Id); Requerida (Req.); Inferior (Inf.); Superior (Sup.)

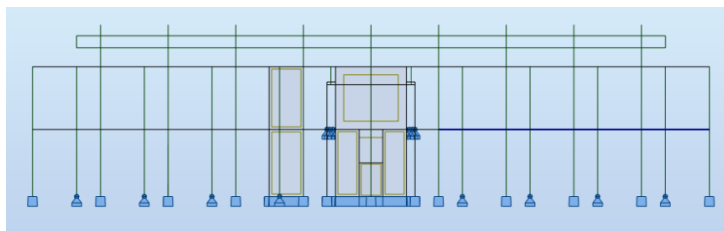
Flexão – Negativa (M_{yy}^+ e M_{xx}^+); Flexão – Positiva (M_{yy}^- e M_{xx}^-); Verificação de Segurança (VS)

Em primeiro lugar convém relembrar o que já foi referido no ponto 3.2.1, alusivo ao programa Robot Structural Analysis, que o módulo de dimensionamento de lajes não é o ponto forte deste programa e neste anexo temos uma melhor percepção disso mesmo. Os valores de flexão presentes na tabela ANEXO I.30 são os esforços máximos que ocorrem para o tipo de laje identificada em todo o modelo, ou seja, podem existir cinco lajes do mesmo tipo em todo o projeto e o painel n do modelo é que possui o esforço de flexão a meio vão para o sentido XX máximo, o que não implica que o valor máximo para o sentido YY ocorra nesse mesmo painel. Também é ligada a opção de redução de esforços sobre pilares e paredes, esta opção é o equivalente à definição de uma faixa para uniformização de esforços, mas que é automatizada para integrar o conjunto de valores na proximidade do pilar ou da parede de suporte. A largura da faixa de ação está diretamente ligada às dimensões das secções dos elementos de suporte.

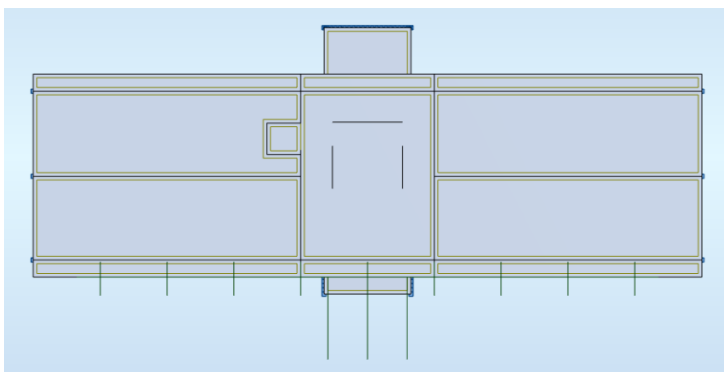
Relativamente aos esforços de flexão alcançados, estes possuem valores com grandezas aparentemente credíveis, mas em alguns casos desproporcionados, ainda assim o maior problema está nas soluções de armadura teórica que o programa atribui. Dou como exemplo os painéis 367 e 49 das palas da cobertura que exibem áreas de armadura teóricas de 11,83 e 8,94 cm²/m para a face superior no sentido YY, isto acaba por não fazer sentido uma vez que os esforços atuantes no painel 367 são inferiores aos do painel 49 e fazendo uma verificação externa ao *software* chegamos a um resultado de armadura necessária de 6,24 cm²/m para o painel 49, uma área menor em comparação com aquela que o programa define. Isto acaba por retirar credibilidade aos resultados e pôr em causa o dimensionamento obtido. Nos esforços de corte estes também aparentam ter valores excessivos o que resulta numa falha da verificação à segurança ao corte, mesmo realizando uma verificação externa. Foi possível compreender, não só nesta dissertação mas em trabalhos realizados nas unidades curriculares de Análise de Estruturas Avançada e Inspeção e Reforço de Estruturas, que fazendo um cálculo expedito dos esforços transversais por metro de uma laje, os valores de corte são inferiores aos que são calculados pelo programa. Estes problemas podem estar relacionados com o facto de o método para determinação de esforços utilizado se basear em elementos finitos e como tal não serão postas em causa as soluções finais atribuídas em projeto.

Em relação aos valores de deformação e largura de fenda, não foram verificados problemas. O valor máximo de largura de fenda alcançado foi de 0,28 mm e a deformação máxima não chega a alcançar 1 cm de flecha, inferior a metade do limite estabelecido.

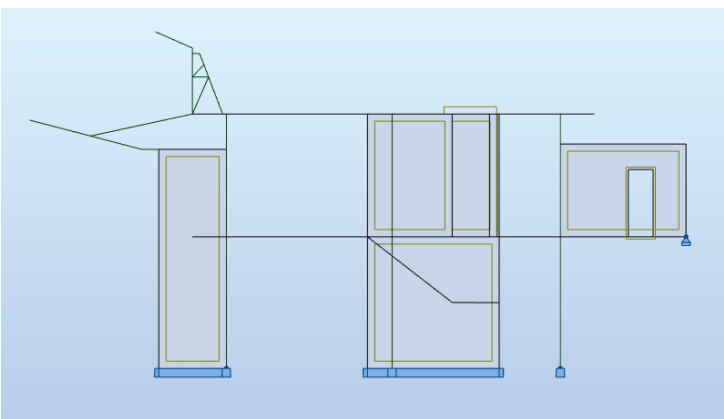
Modelo de Cálculo



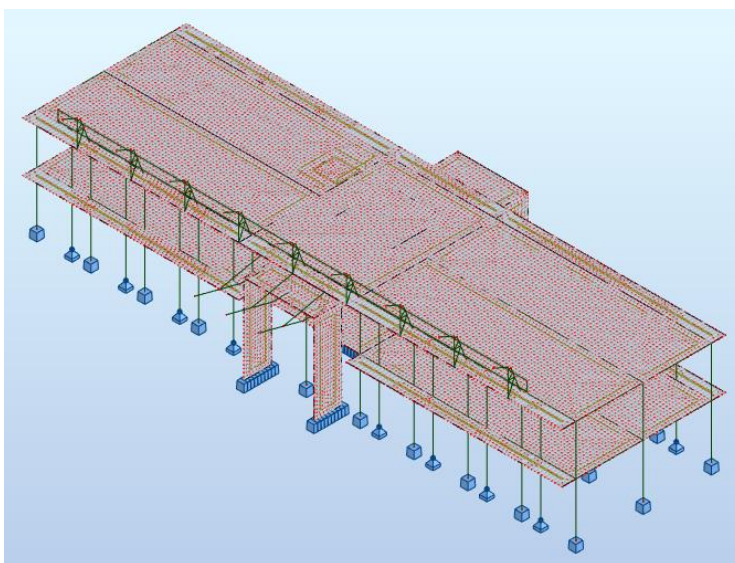
a) Vista frontal do modelo de cálculo



b) Topo



c) Lateral direita



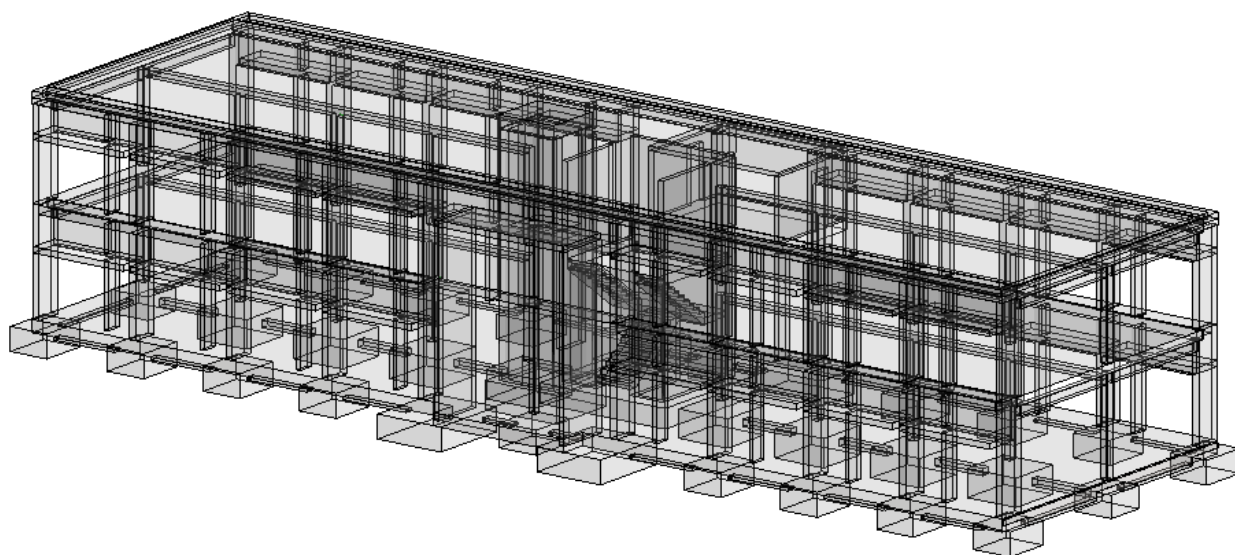
d) Perspectiva tridimensional com representação da malha de elementos finitos aplicada. (Pontos da malha identificados a vermelho)

Figura I.2 – Imagens representativas do modelo de cálculo simplificado

Modelos 3D de Armaduras

Edifício Administrativo

– Sem elementos de armadura



– Com elementos de armadura

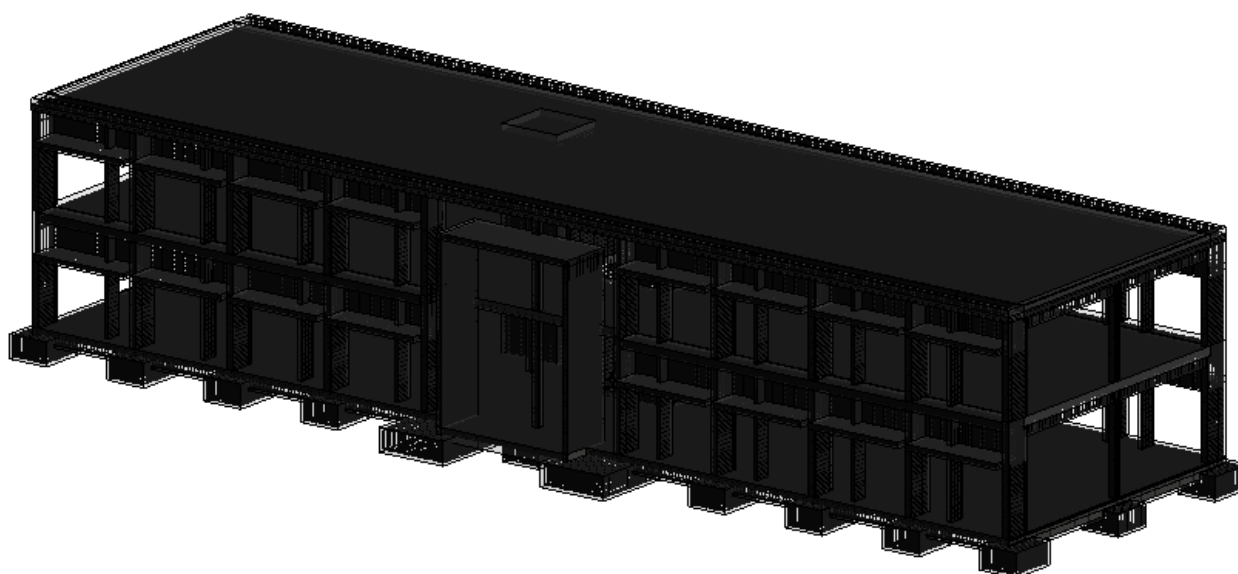


Figura I.3 – Modelos 3D de armaduras – Visão global do edifício administrativo

Sapatas

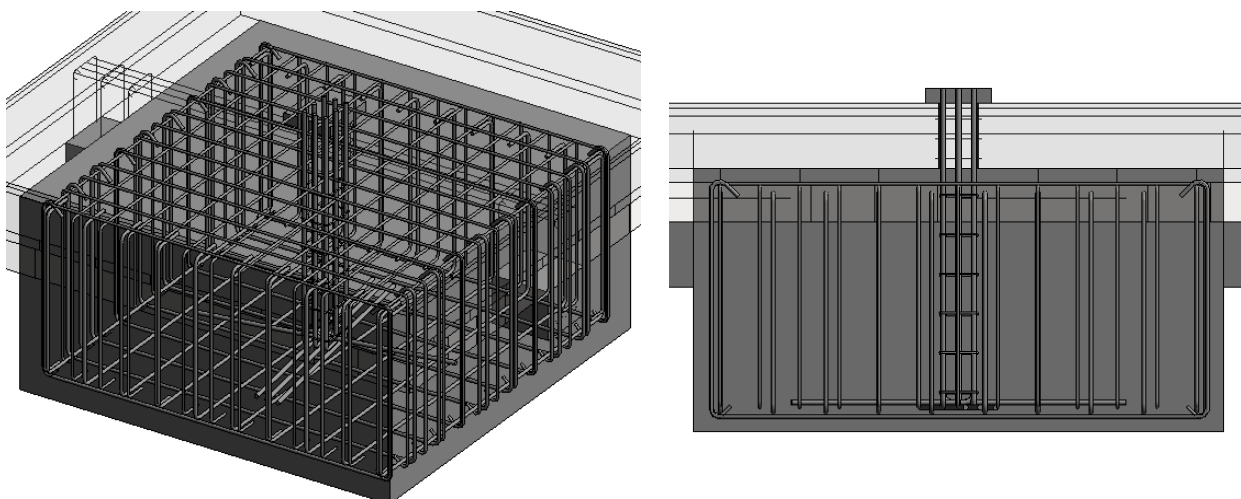


Figura I.4 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S1 – 200 x 200 x 100 cm³

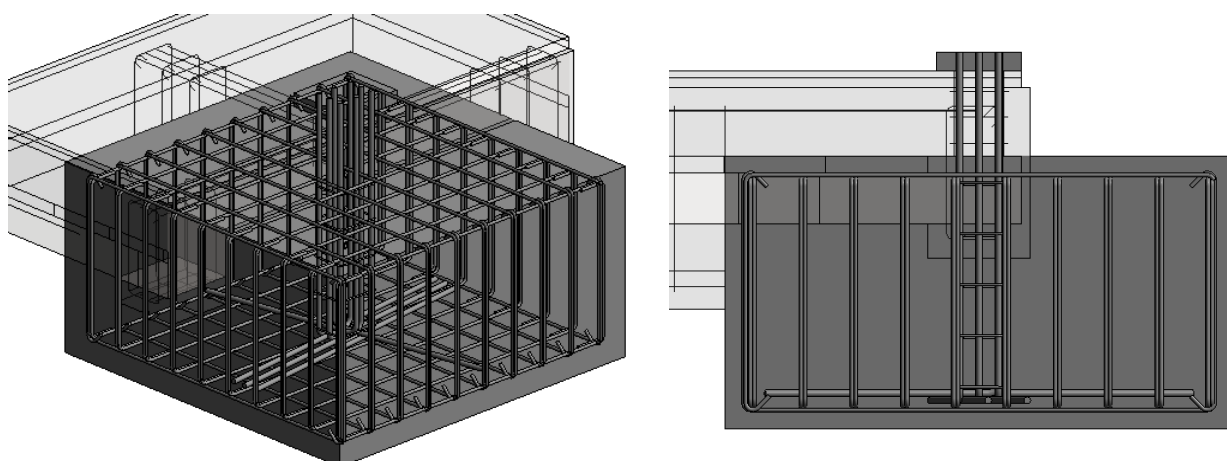


Figura I.5 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S2 – 150 x 150 x 80 cm³

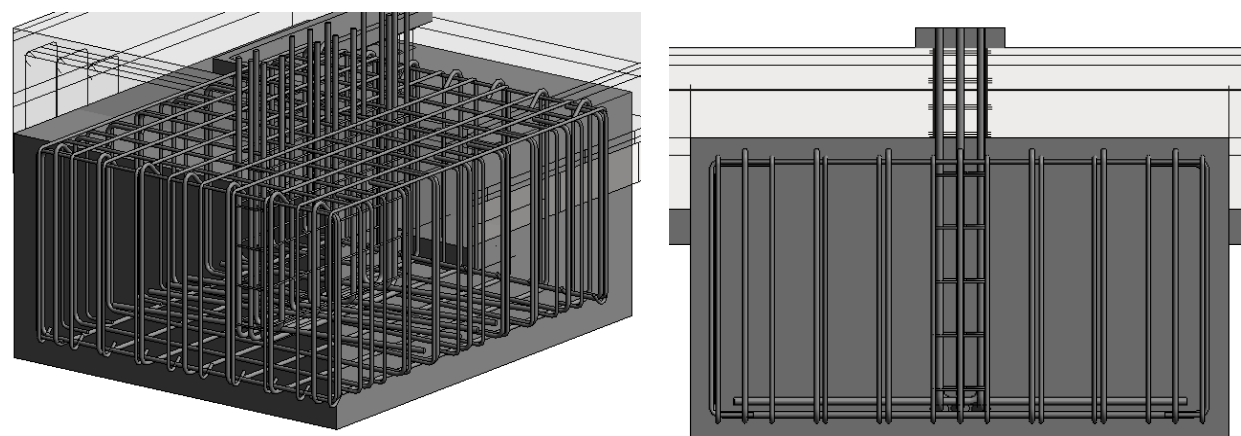


Figura I.6 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S3 – 150 x 180 x 85 cm³

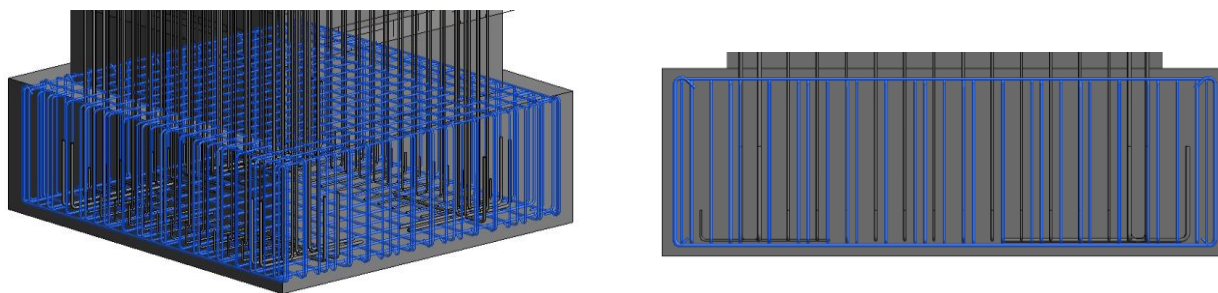


Figura I.7 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S4 – $290 \times 275 \times 100 \text{ cm}^3$

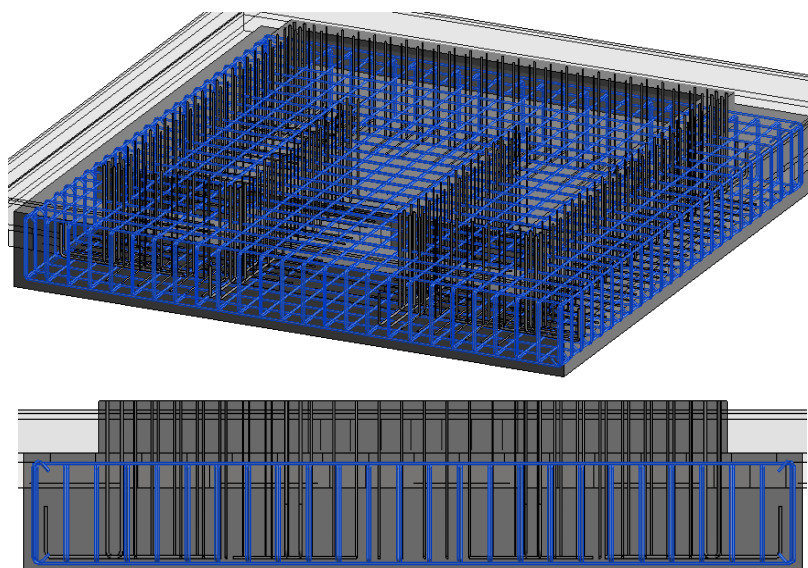


Figura I.8 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S5 – $515 \times 495 \times 70 \text{ cm}^3$

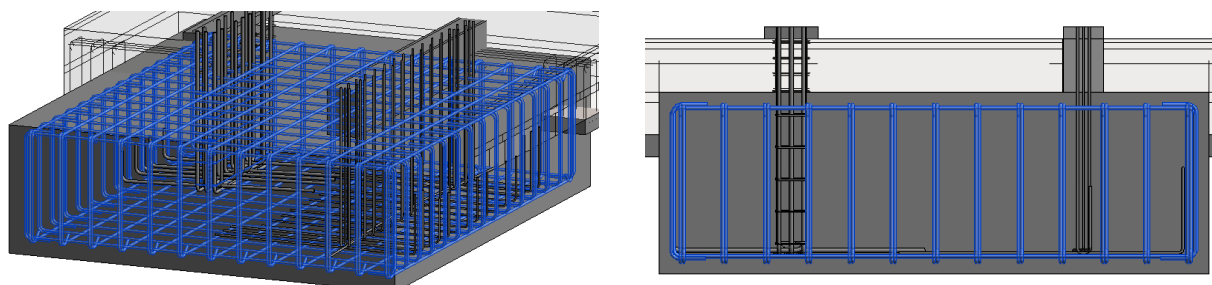


Figura I.9 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S6 – $260 \times 305 \times 85 \text{ cm}^3$

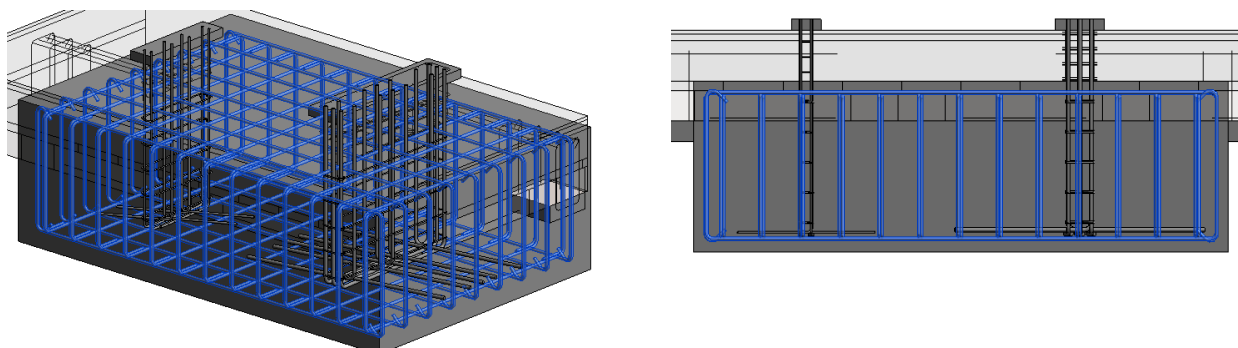
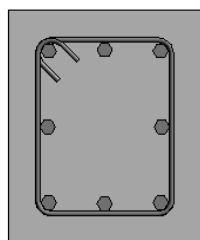
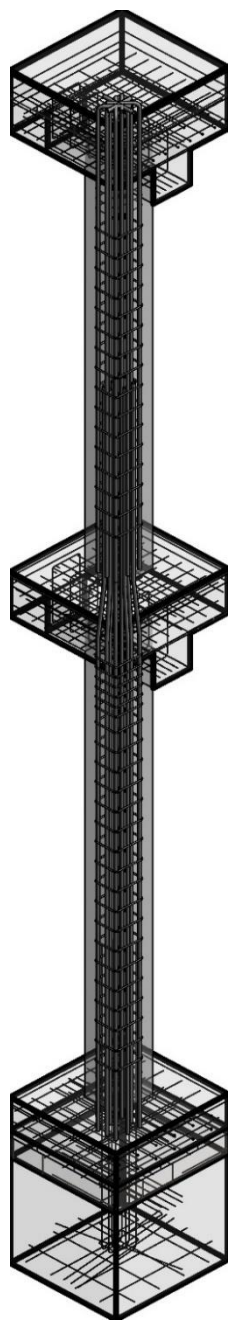


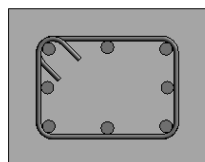
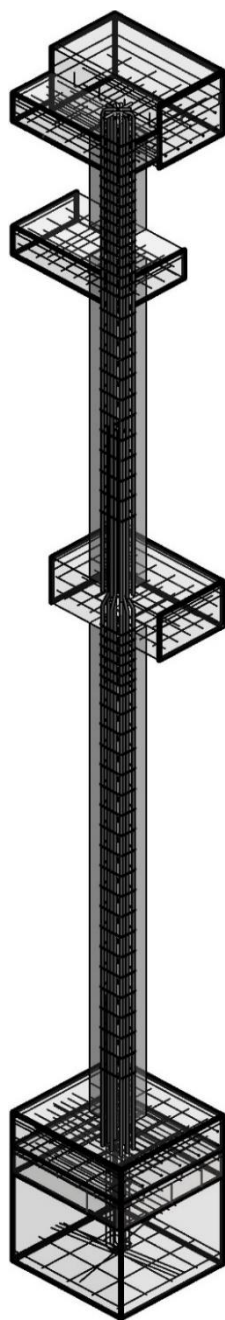
Figura I.10 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S9 – $270 \times 180 \times 85 \text{ cm}^3$

Pilares

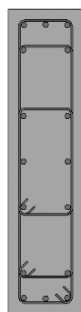
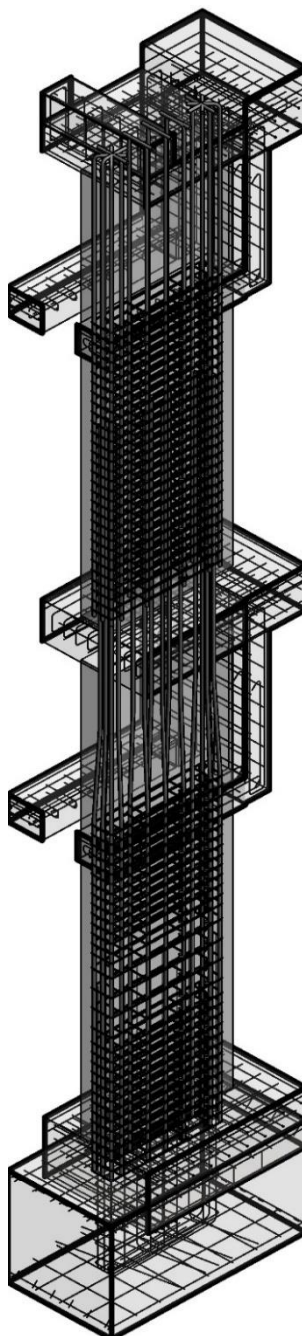
P1 – 30 x 25 cm²



P2 – 20 x 25 cm²



P3 – 101 x 25 cm²



P4 – 61 x 15 cm²

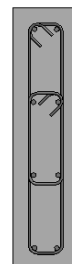
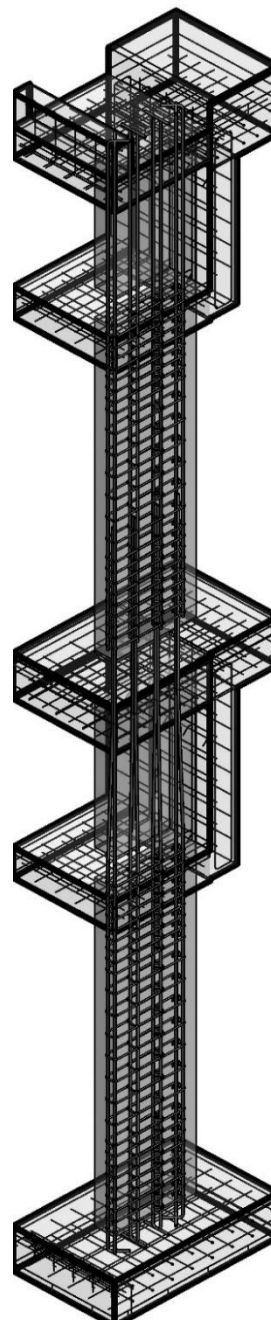
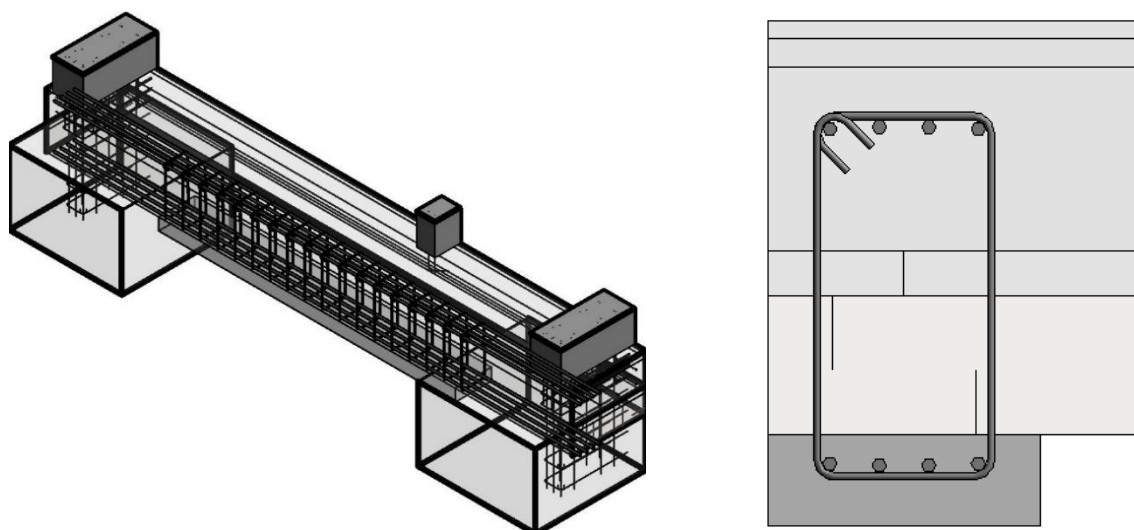
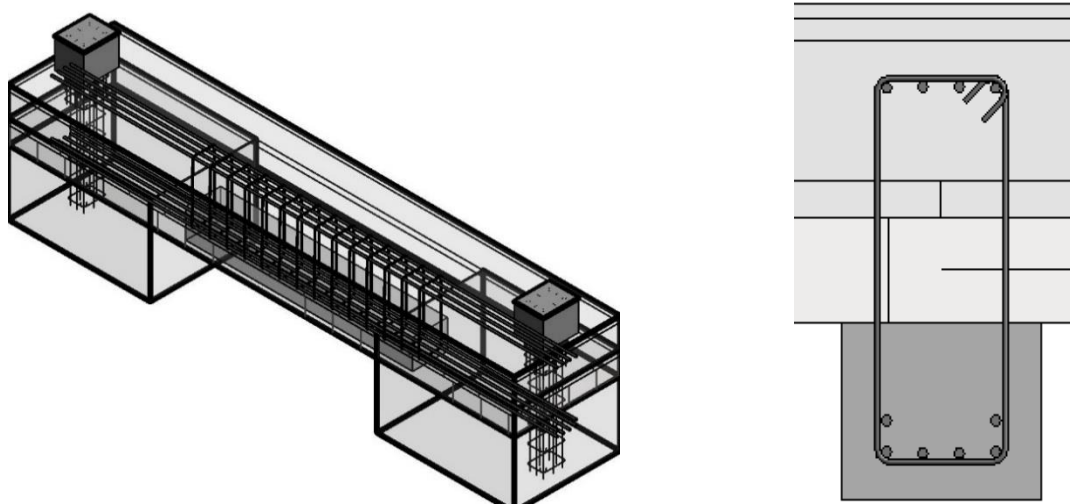
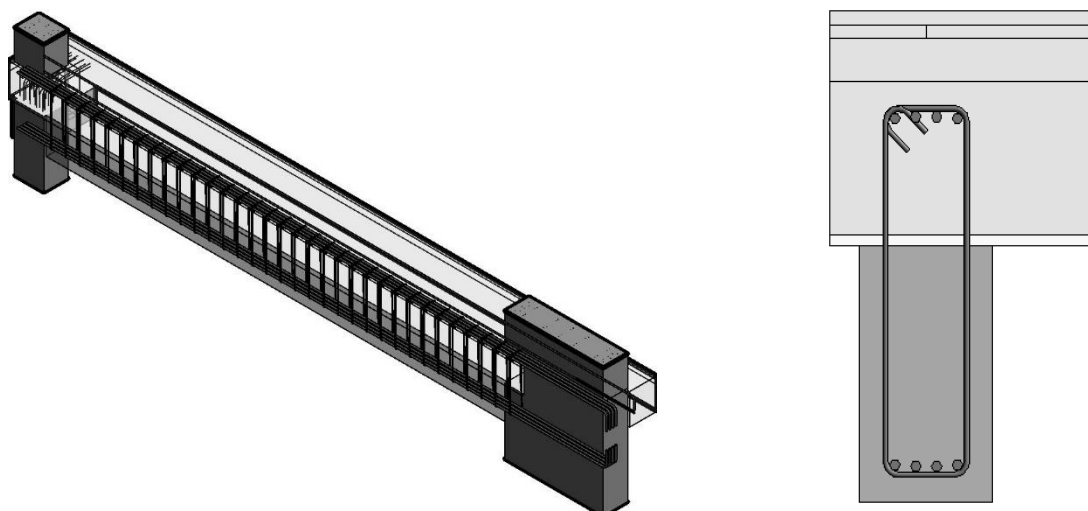


Figura I.11 – Modelos 3D de armaduras – Pilares

Vigas

Figura I.12 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE1 – $30 \times 50 \text{ cm}^2$ Figura I.13 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE3 – $30 \times 65 \text{ cm}^2$ Figura I.14 – Modelos 3D de armaduras – Viga V1 – $20 \times 60 \text{ cm}^2$

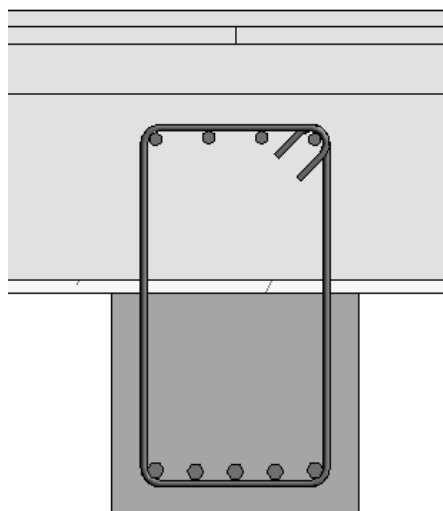
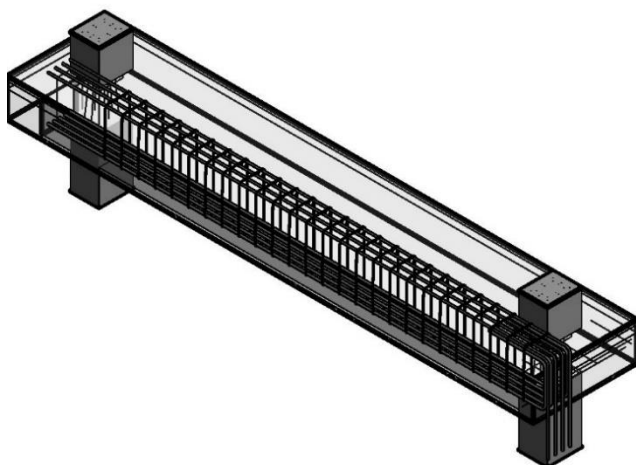


Figura I.15 – Modelos 3D de armaduras – Viga V2 – $30 \times 50 \text{ cm}^2$

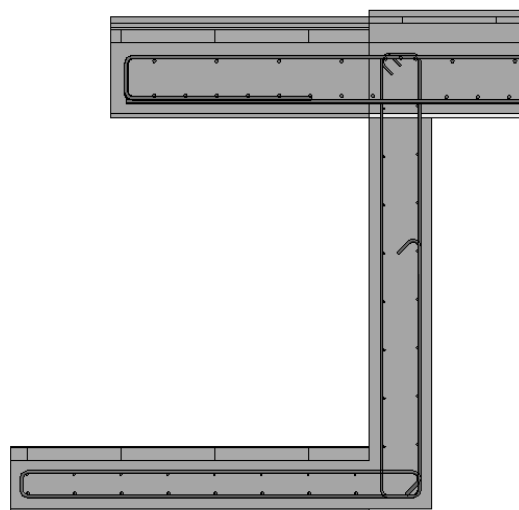
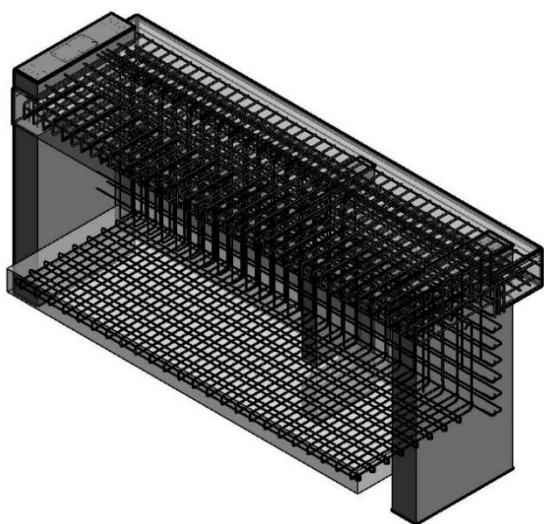


Figura I.16 – Modelos 3D de armaduras – Viga V3 – $20 \times 145 \text{ cm}^2$

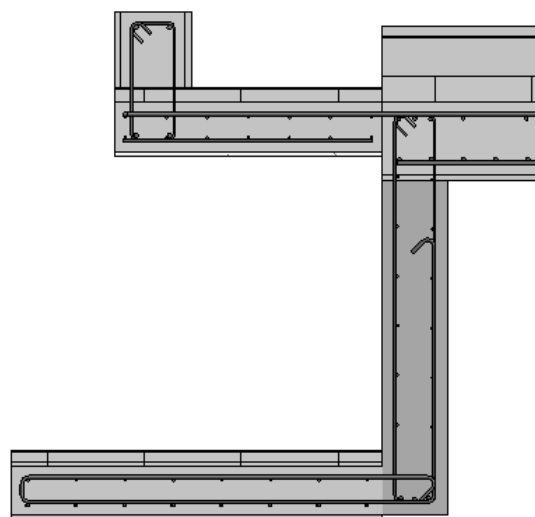
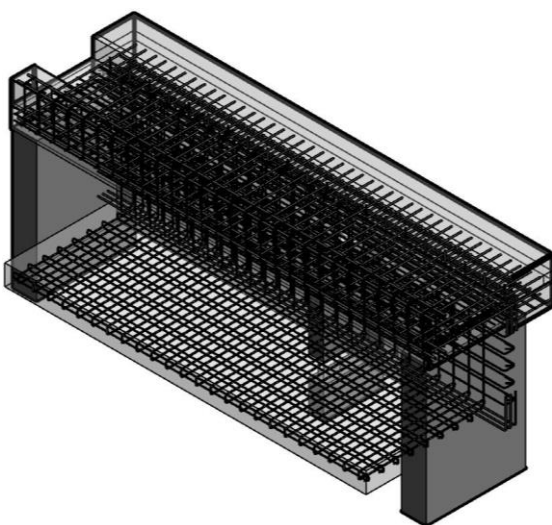


Figura I.17 – Modelos 3D de armaduras – Viga V3 – $20 \times 125 \text{ cm}^2$

Caixa de Elevadores

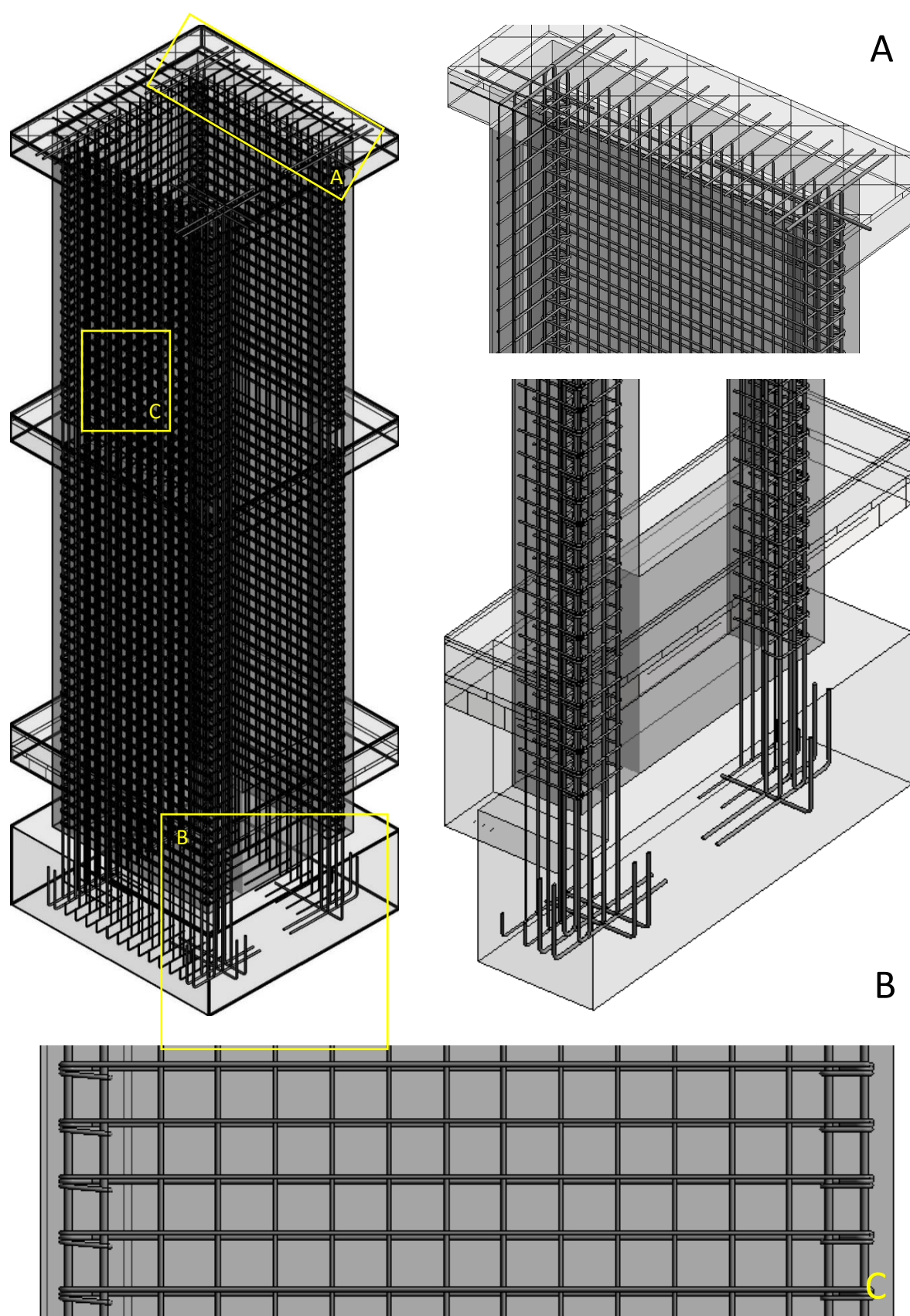


Figura I.18 – Modelos 3D de armaduras – Caixa de Elevadores do edifício administrativo

Caixa de Escadas

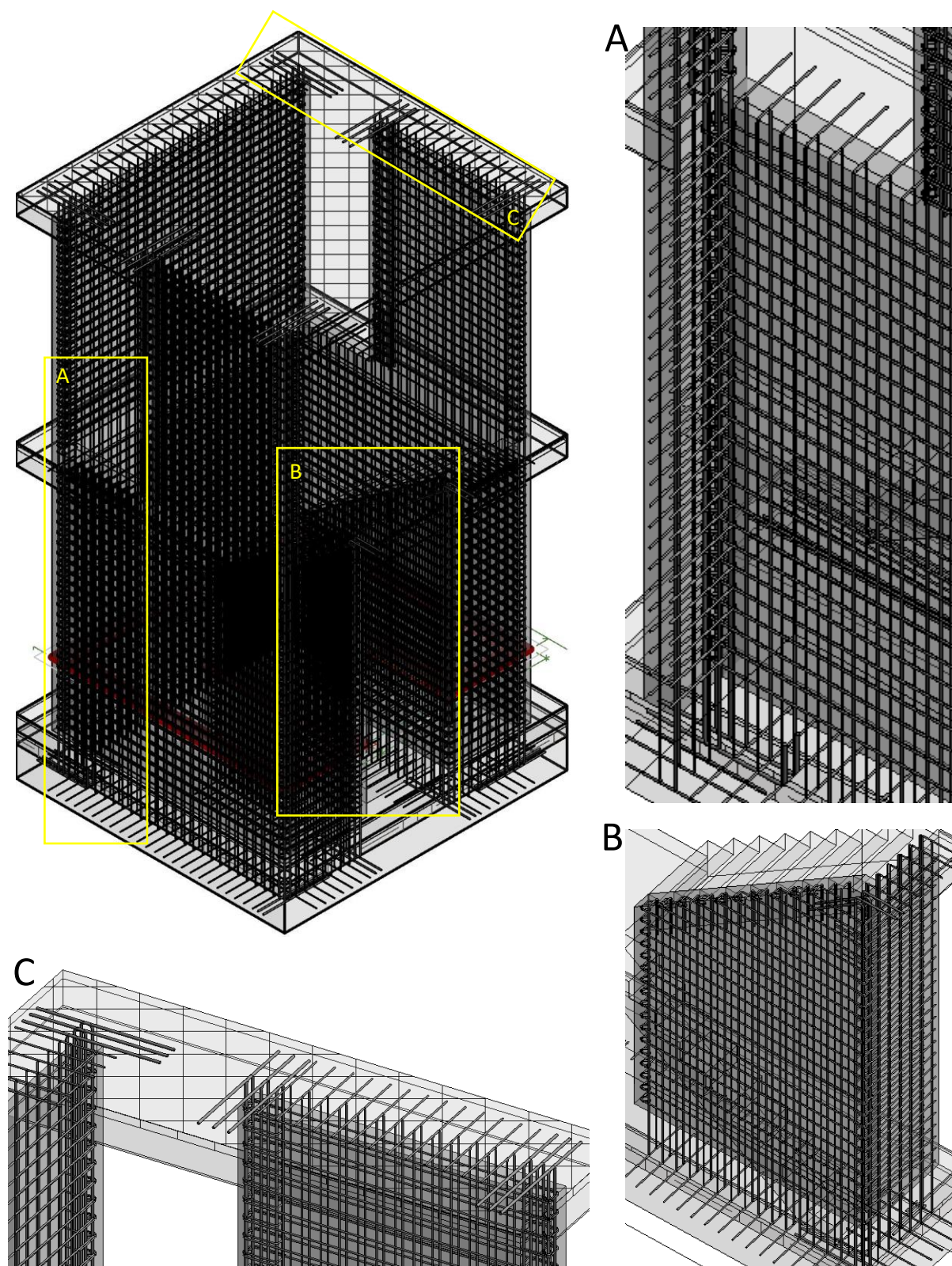


Figura I.19 – Modelos 3D de armaduras – Paredes da caixa de escadas do edifício administrativo

Escadas

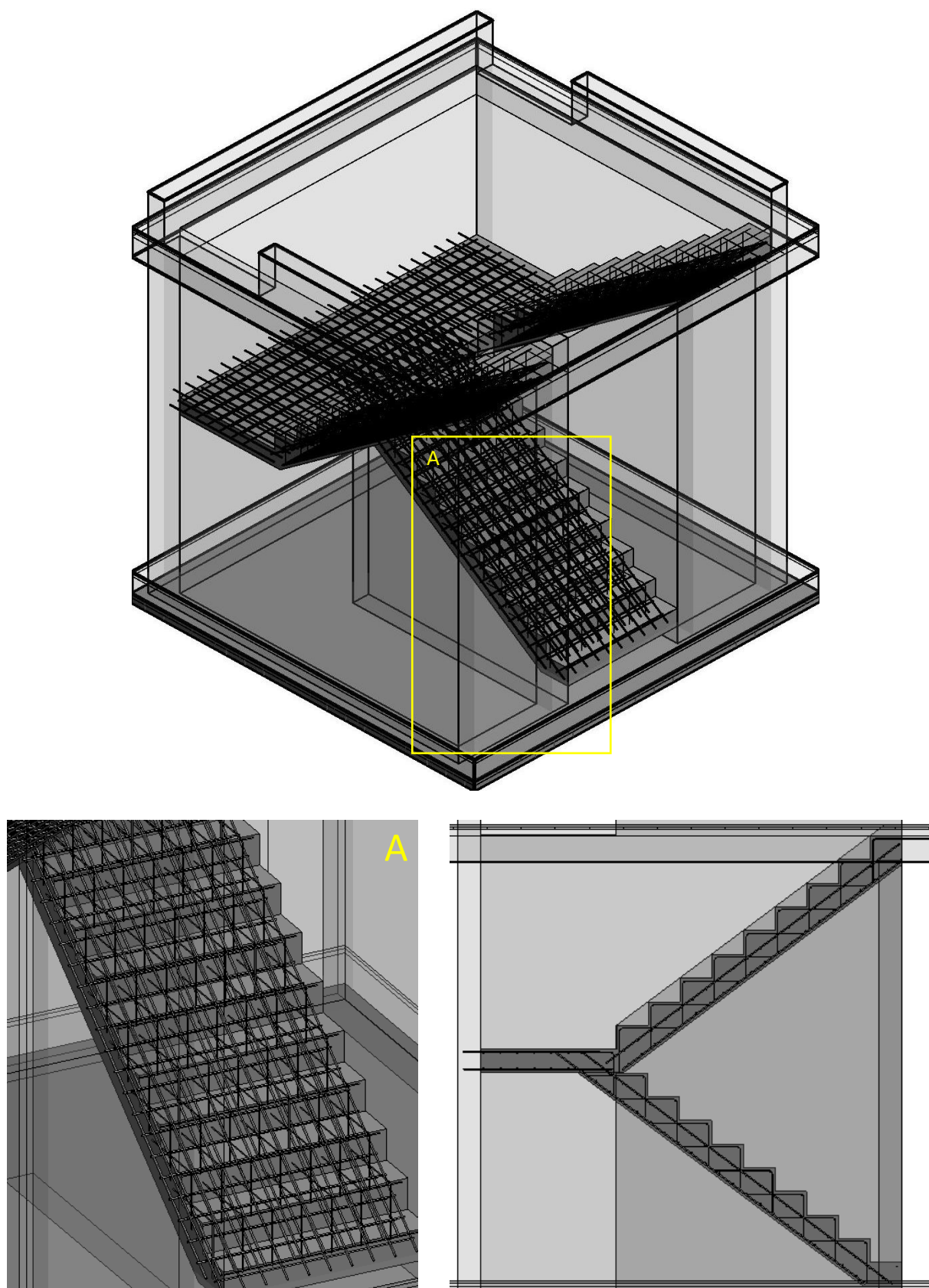


Figura I.20 – Modelos 3D de armaduras – Escadas do edifício administrativo

Lajes 1 – Rés-do-chão

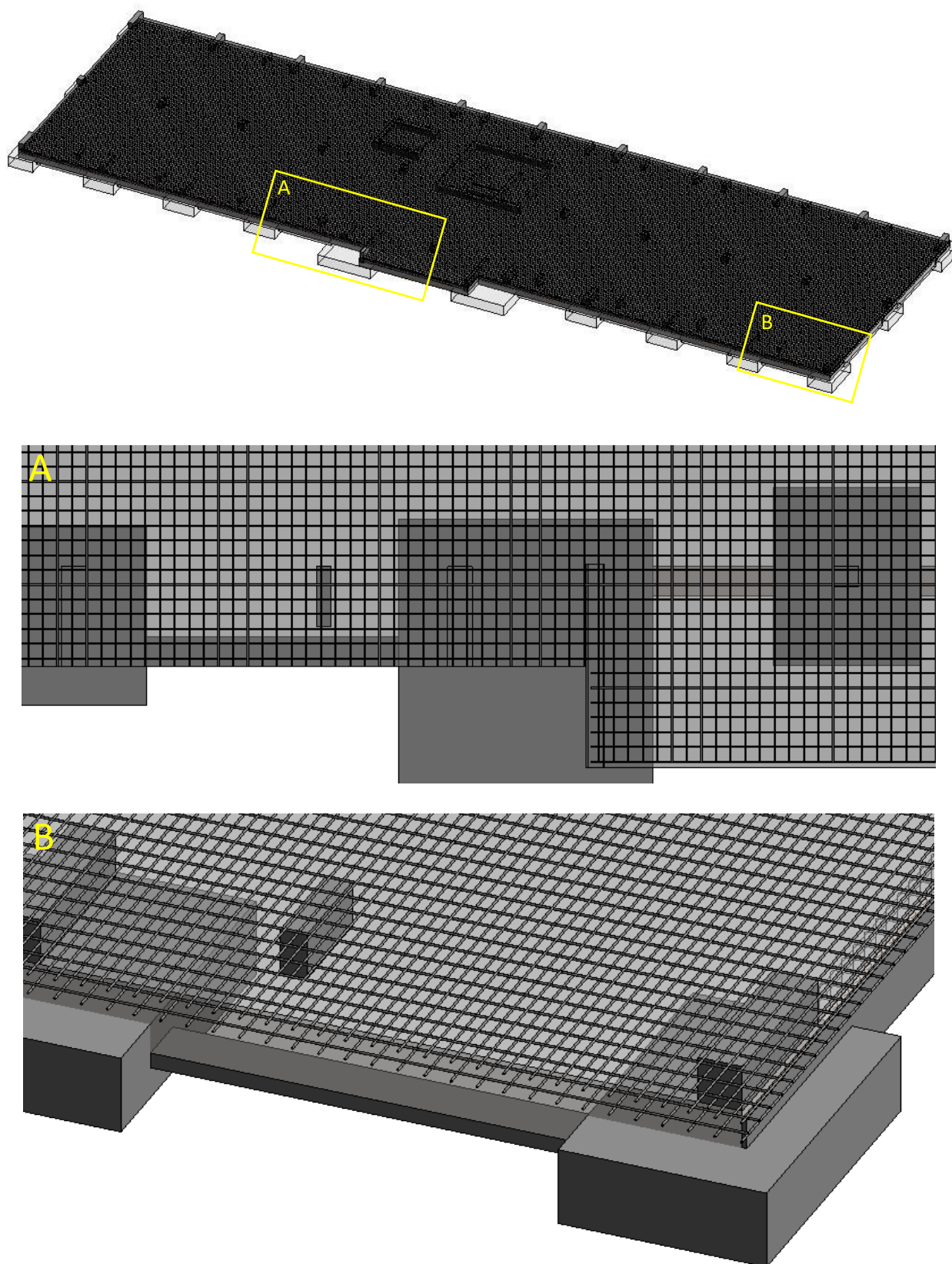


Figura I.21 – Modelos 3D de armaduras – Laje do rés-do-chão do edifício administrativo

Lajes 2 – Primeiro piso

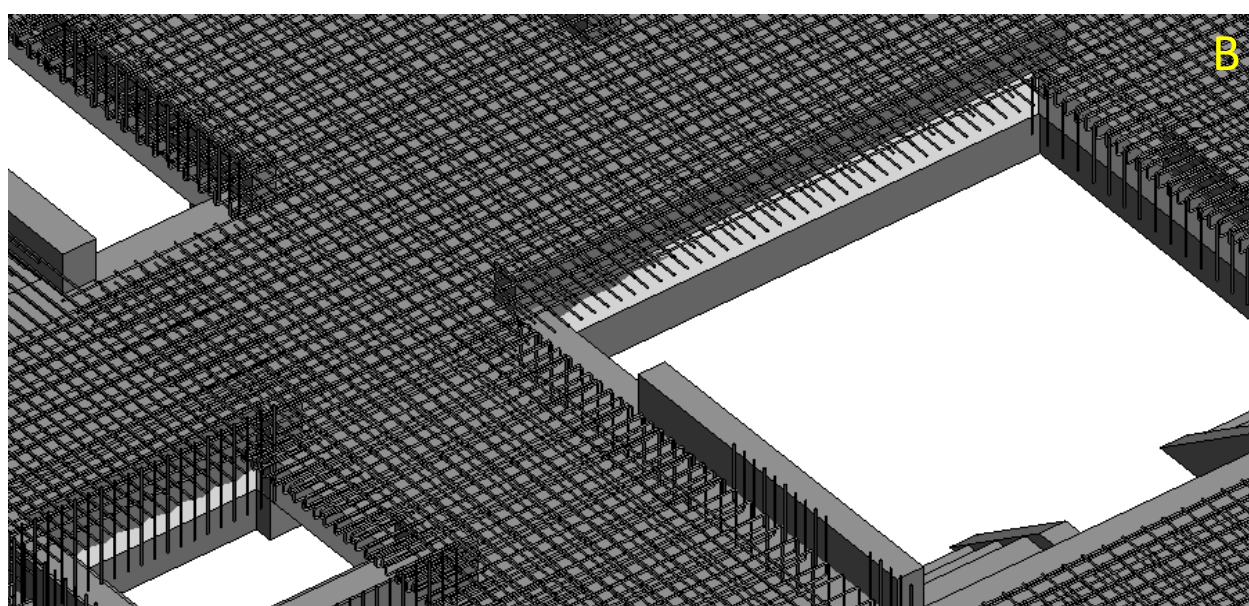
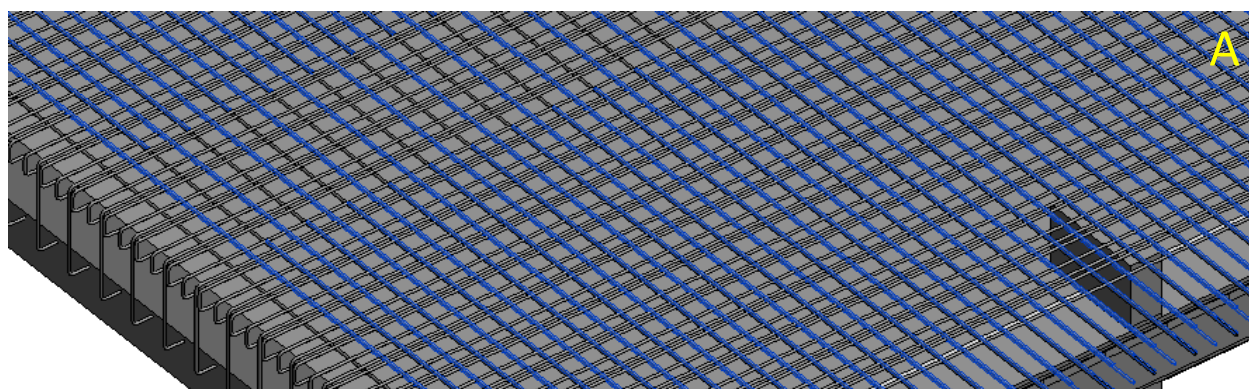
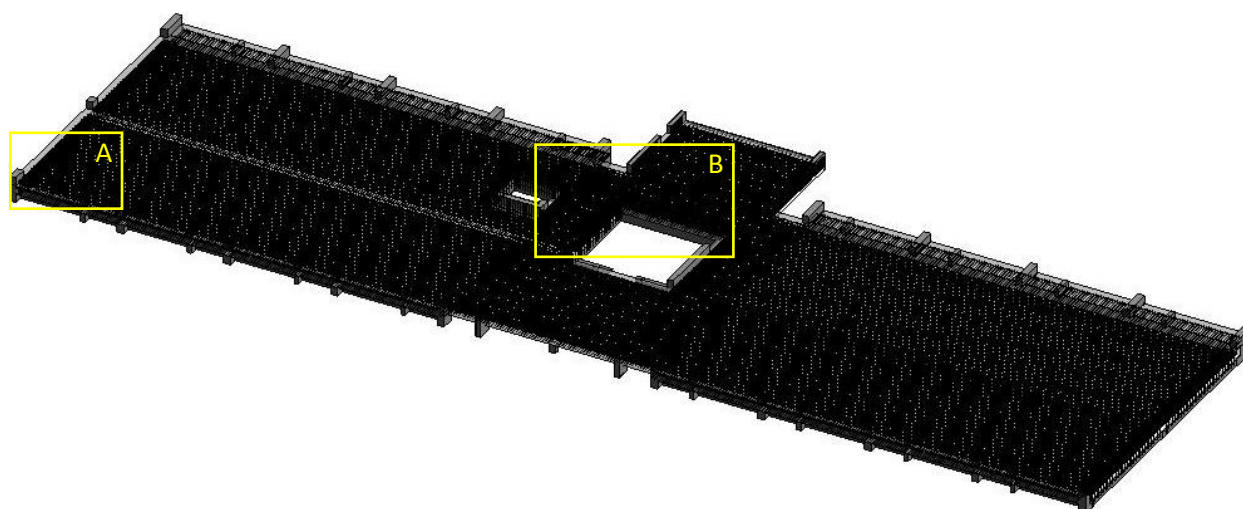


Figura I.22 – Modelos 3D de armaduras – Laje do 1º piso do edifício administrativo

Lajes 3 – Cobertura

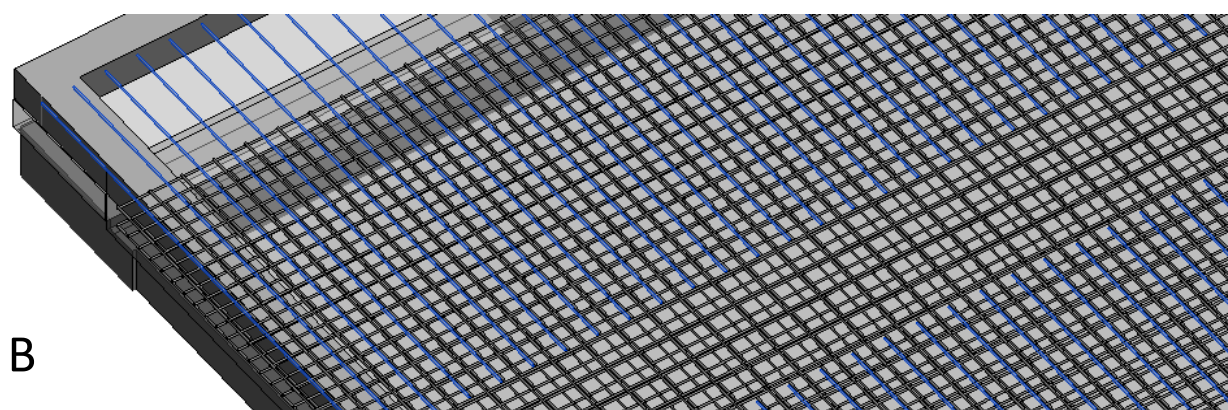
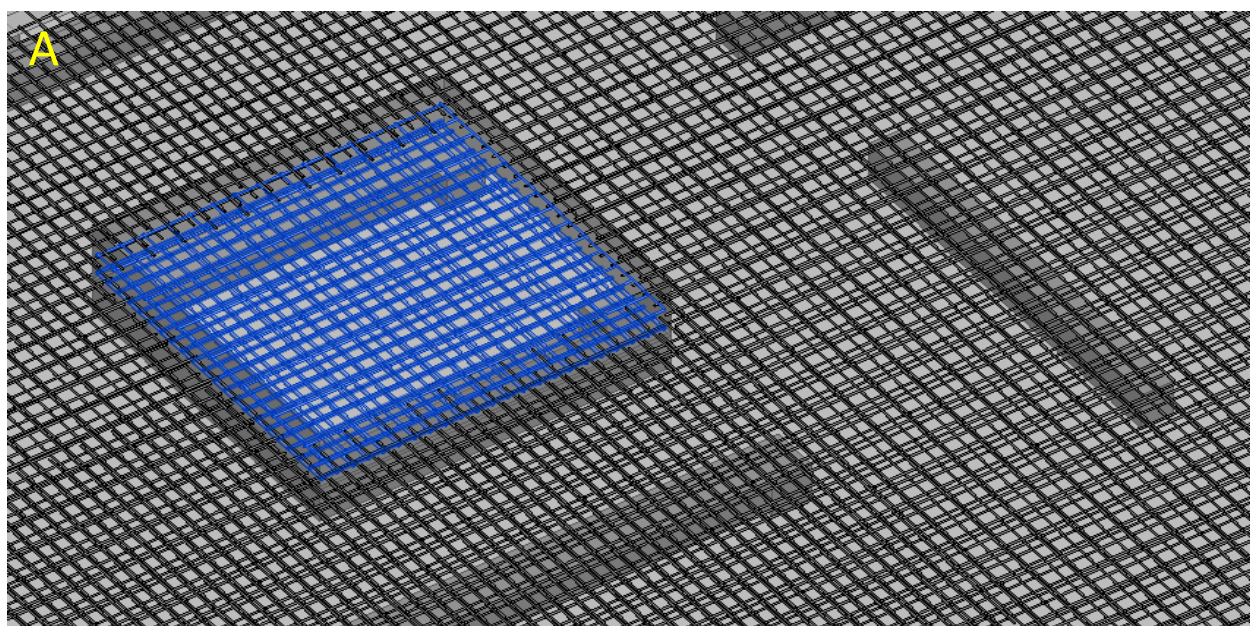
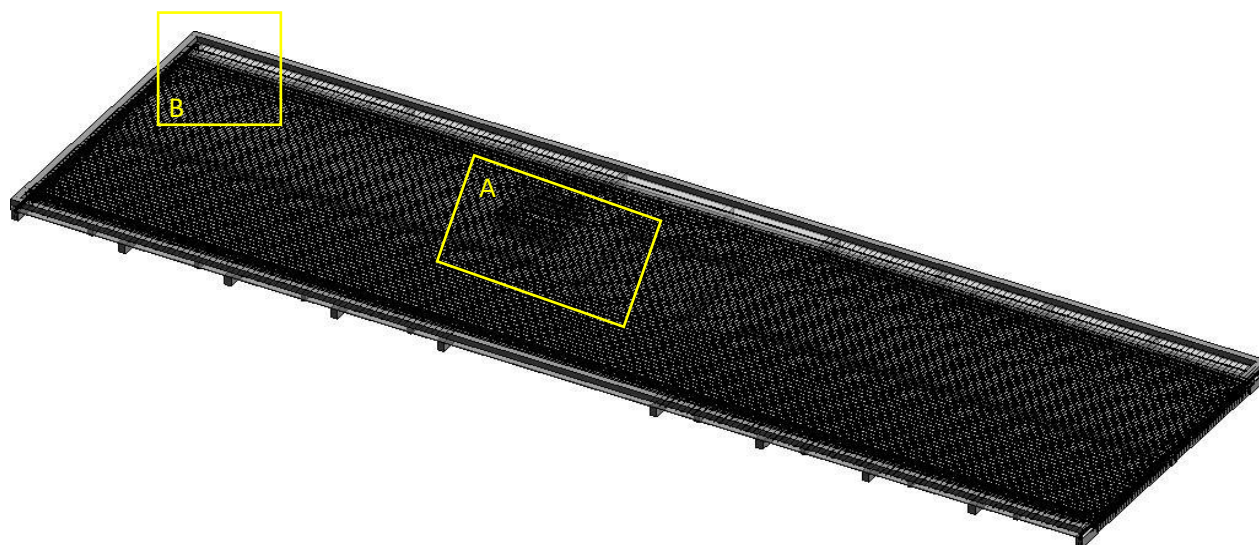


Figura I.23 – Modelos 3D de armaduras – Laje de cobertura do edifício administrativo

Acesso ao Anfiteatro

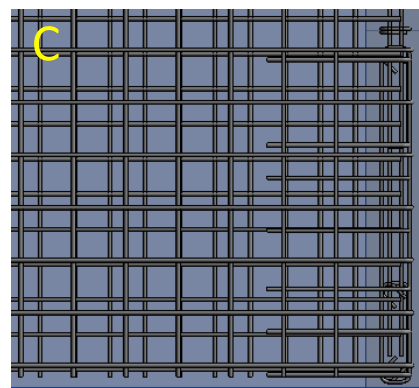
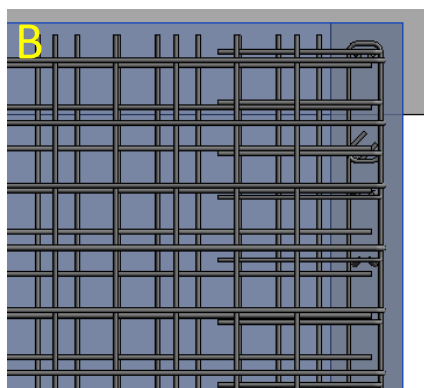
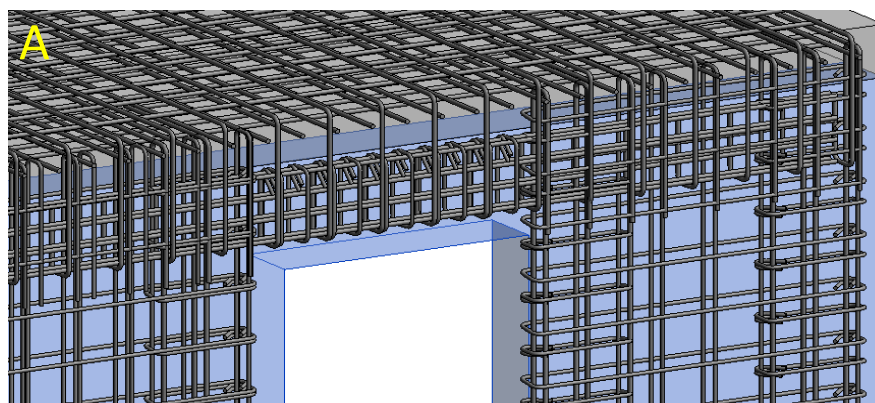
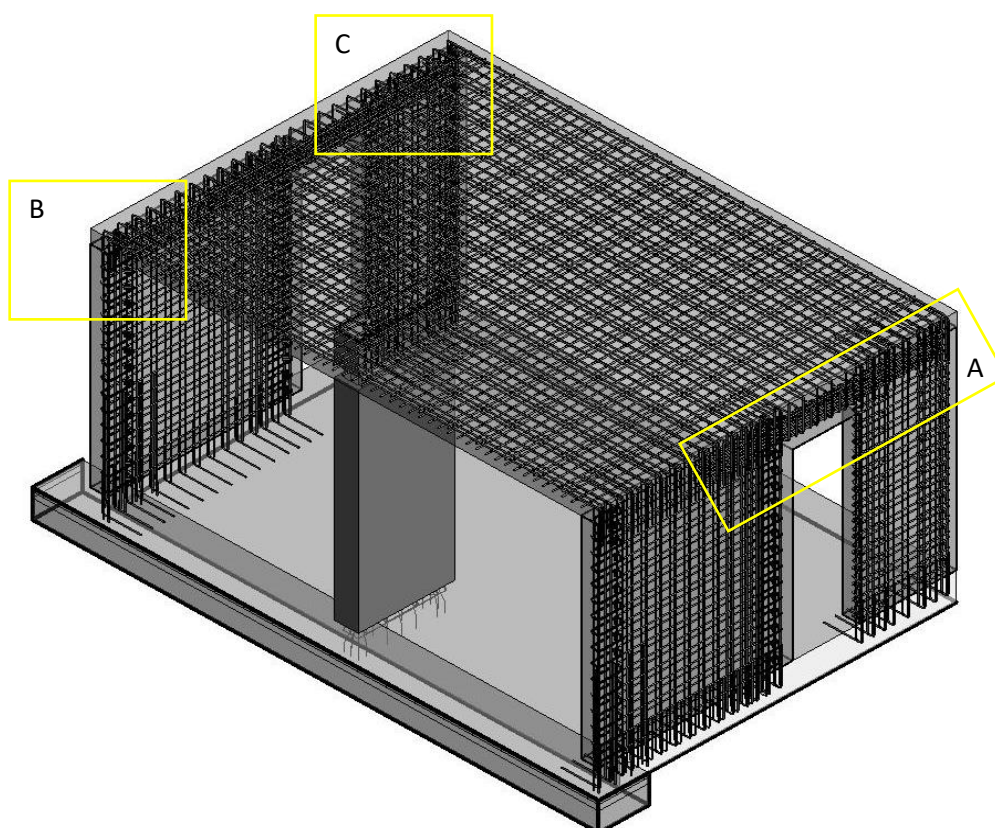
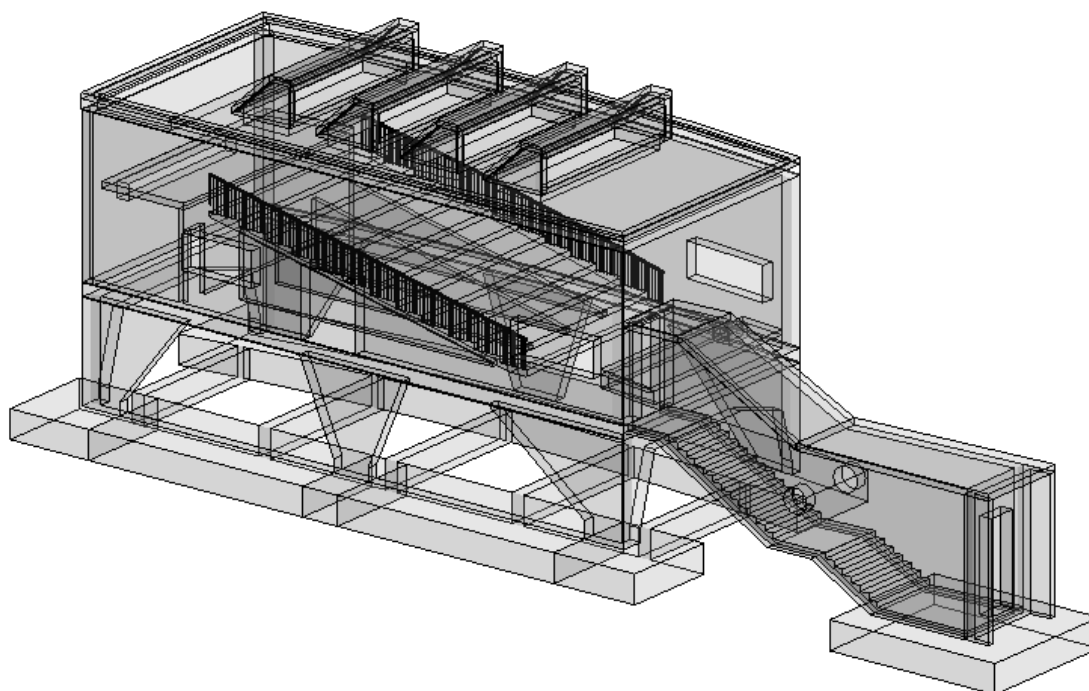


Figura I.24 – Modelos 3D de armaduras – Acesso ao Anfiteatro

Espaço de Conferências

– Sem elementos de armadura



– Com elementos de armadura

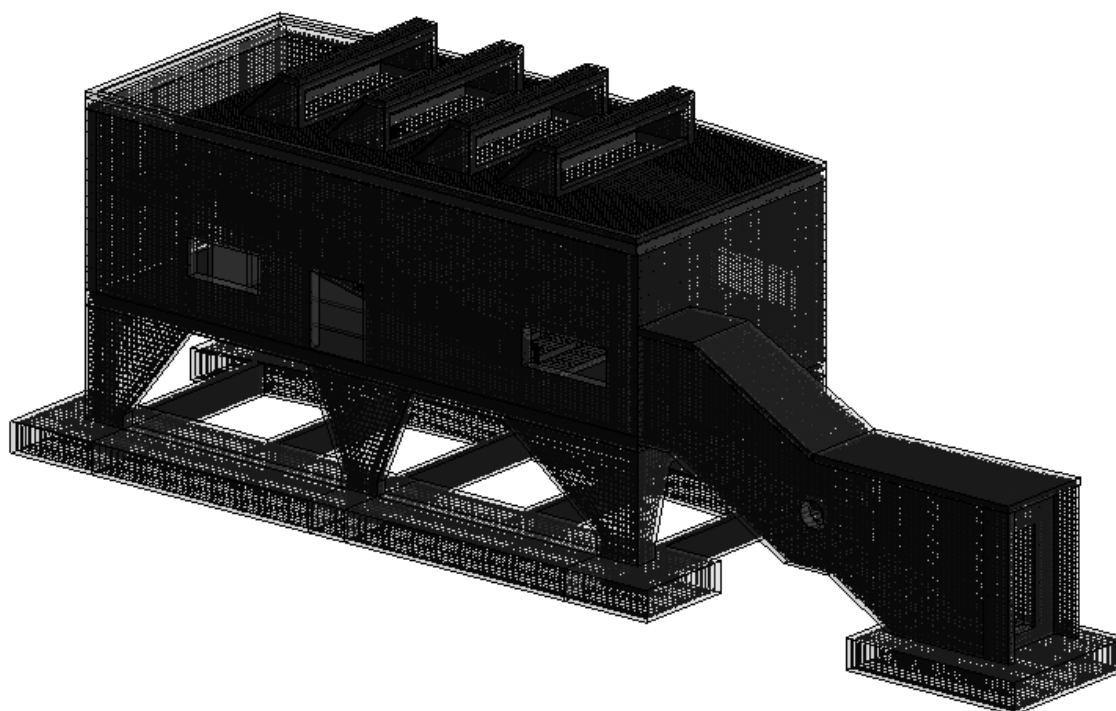


Figura I.25 – Modelos 3D de armaduras – Visão global do espaço de conferências

Fundações – Sapatas e Vigas de Equilíbrio

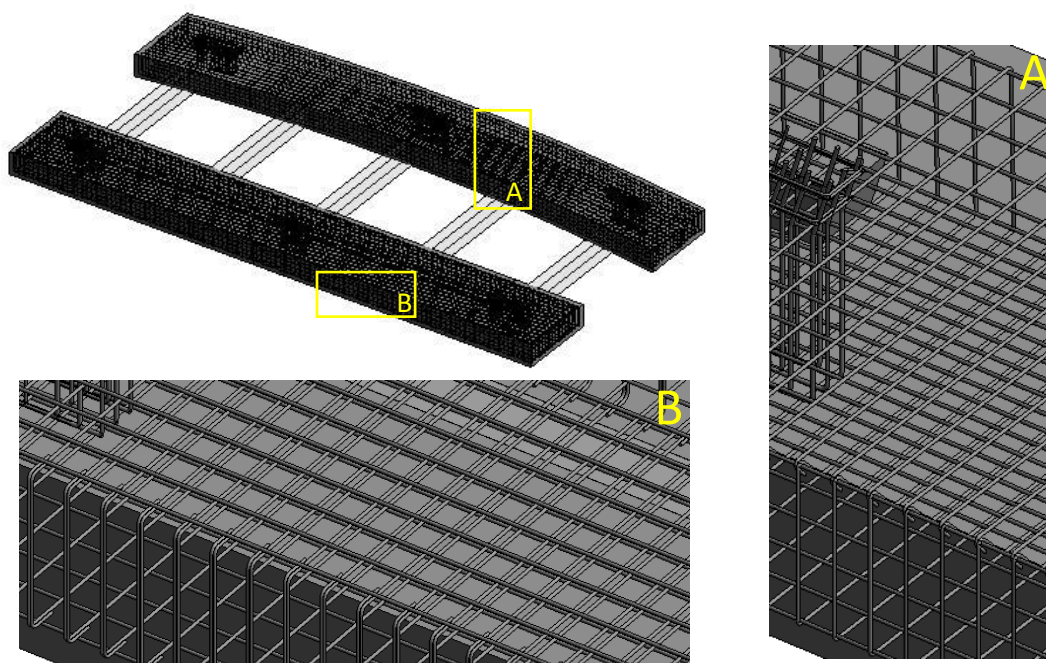


Figura I.26 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S7 – 310 x Var. x 90 cm³

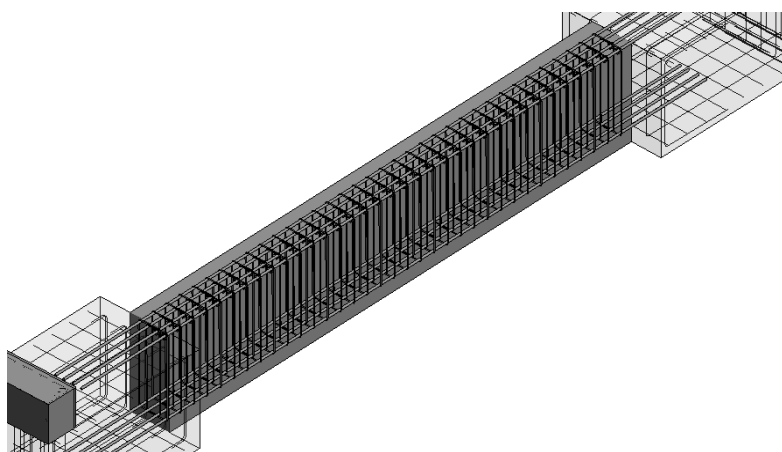


Figura I.27 – Modelos 3D de armaduras – Viga VE2 – 40 x 90 cm²

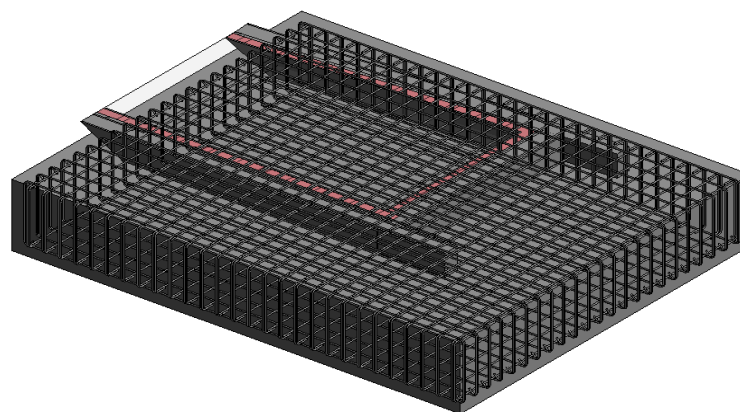


Figura I.28 – Modelos 3D de armaduras – Sapata S8 – 570 x 465 x 90 cm³

Paredes de Suporte em Betão Armado

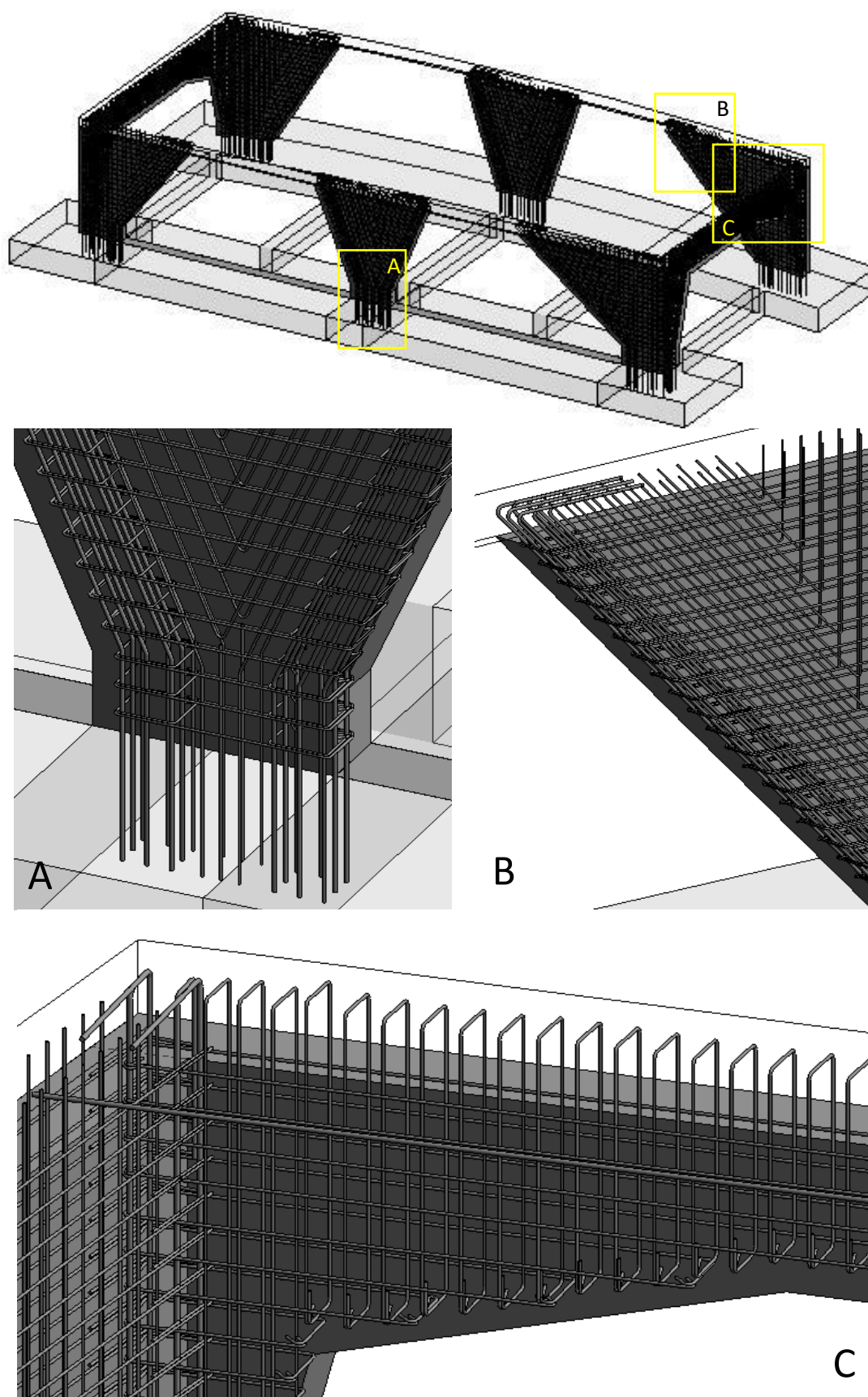


Figura I.29 – Modelos 3D de armaduras – Paredes suporte do centro de conferências

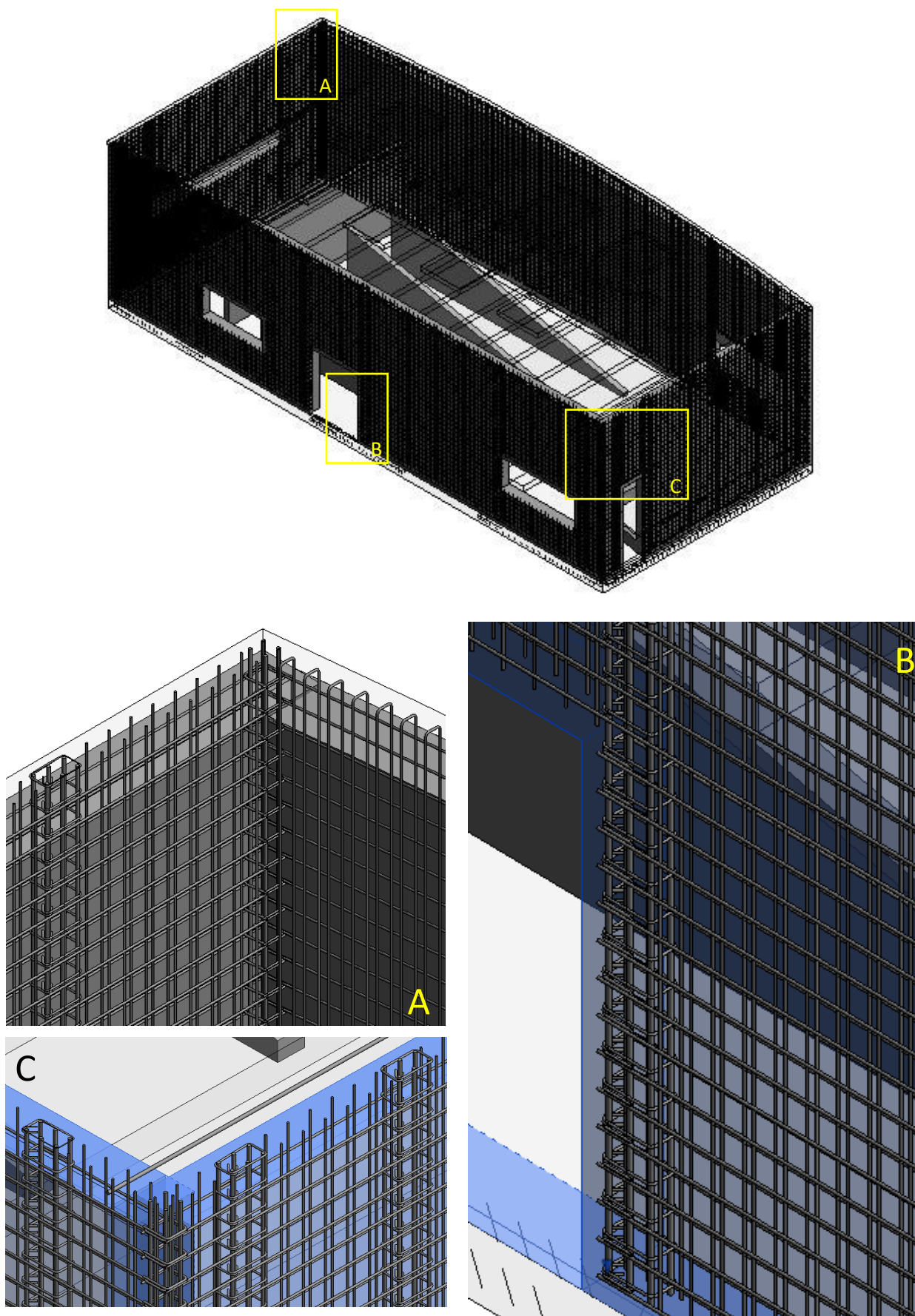


Figura I.30 – Modelos 3D de armaduras – Paredes de suporte à cobertura do centro de conferências

Acesso Exterior – Paredes

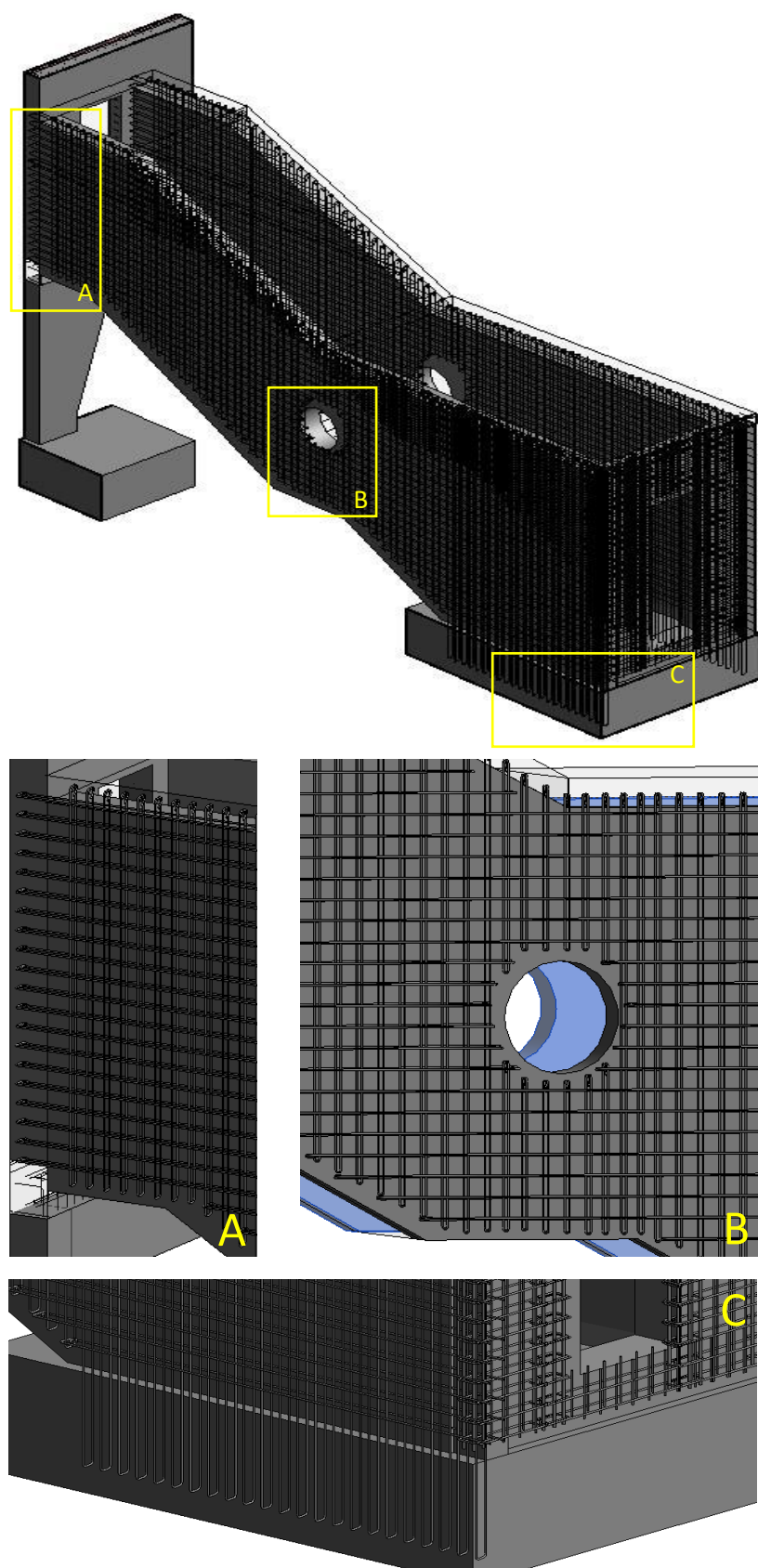


Figura I.31 – Modelos 3D de armaduras – Paredes do acesso exterior do centro de conferências

Acesso Exterior – Escadas e Cobertura

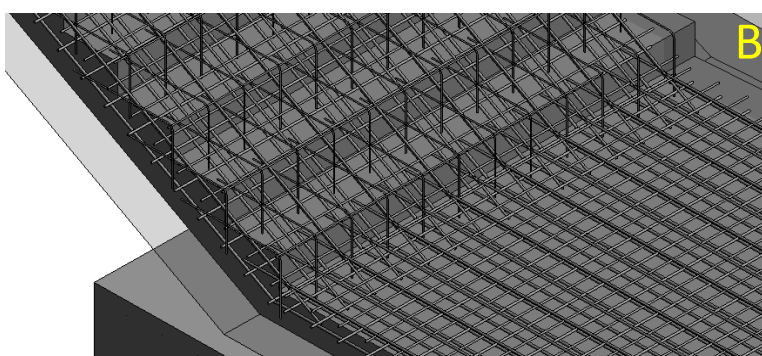
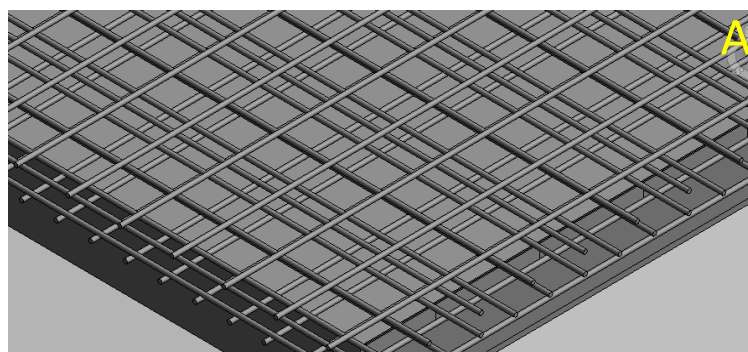
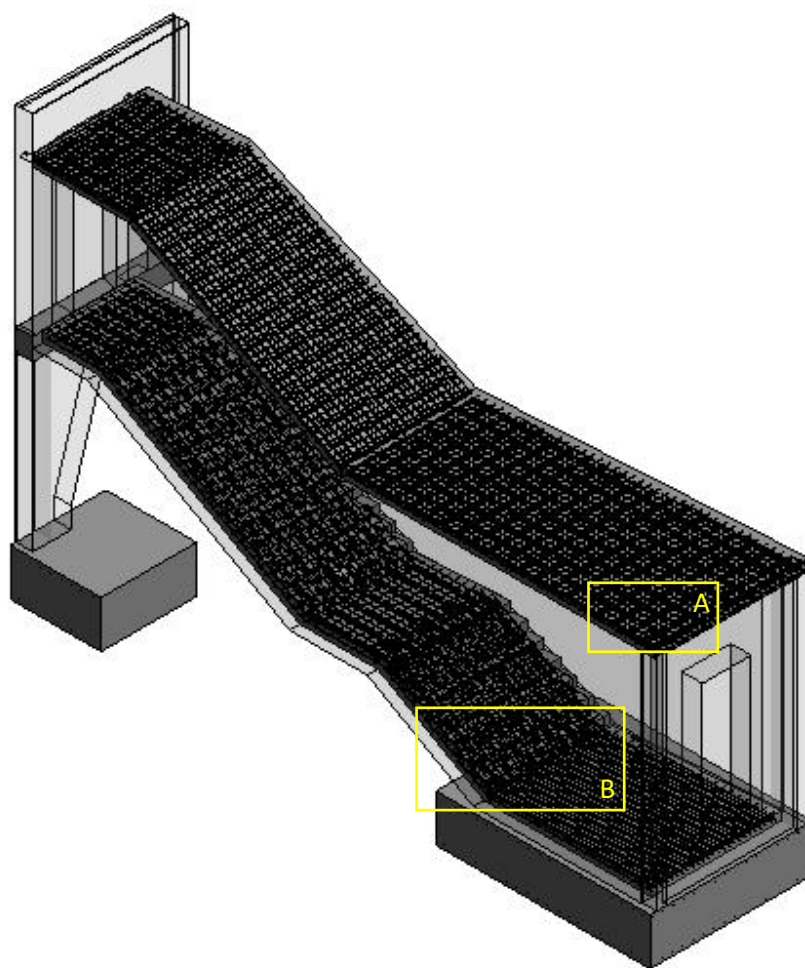


Figura I.32 – Modelos 3D de armaduras – Lajes do acesso exterior do centro de conferências

Lajes 1 – Piso Interior

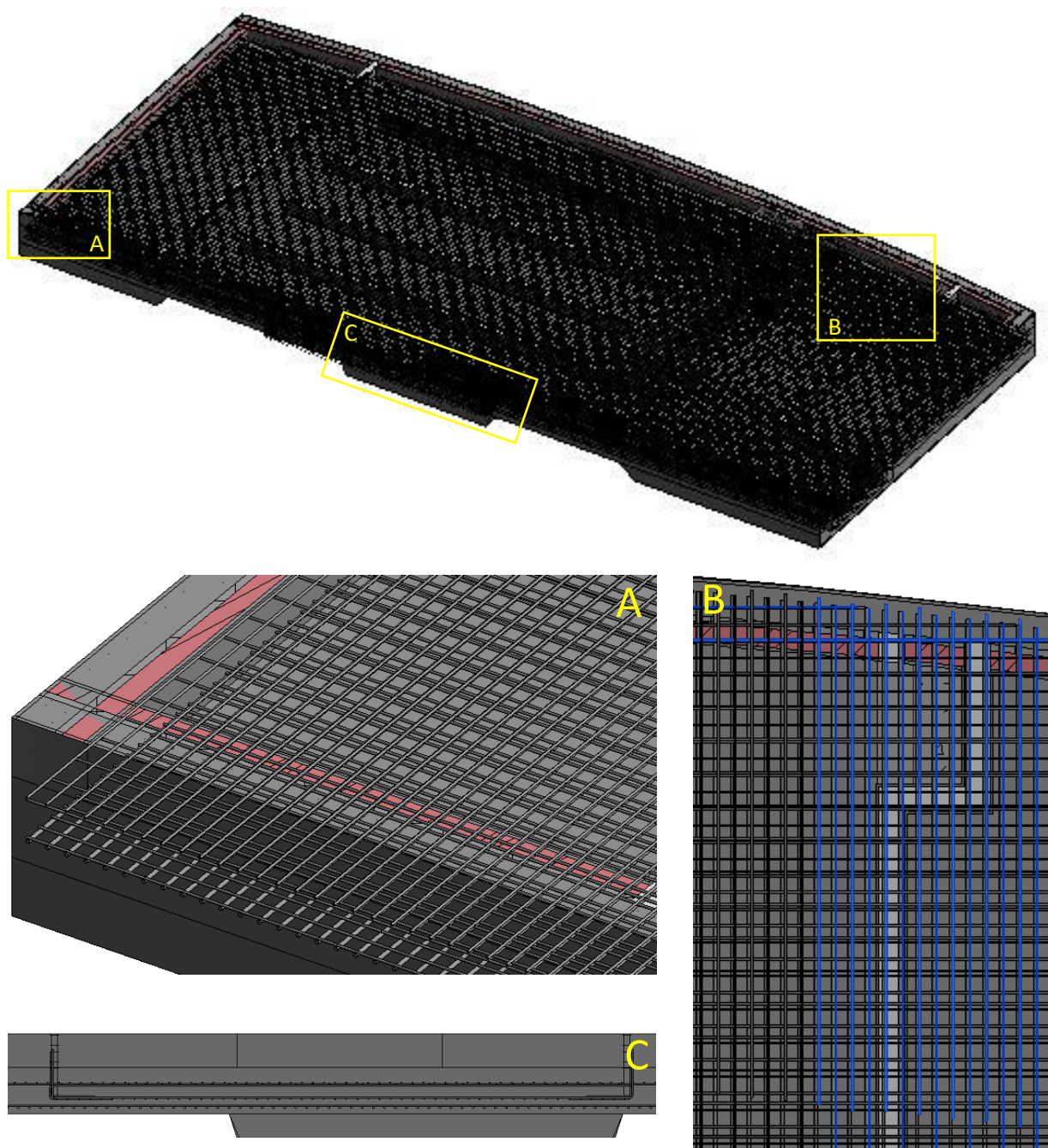


Figura I.33 – Modelos 3D de armaduras – Laje de piso interior do centro de conferências

Lajes 2 – Cobertura

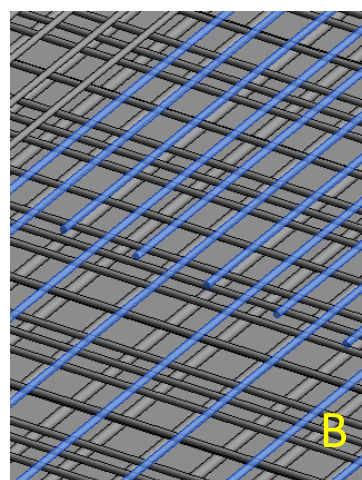
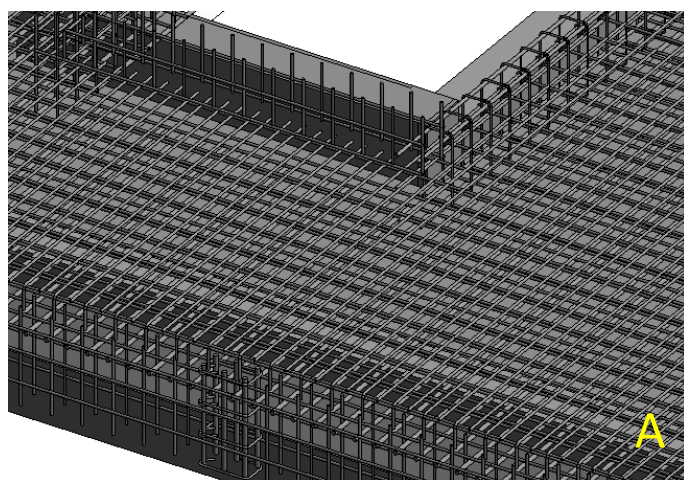
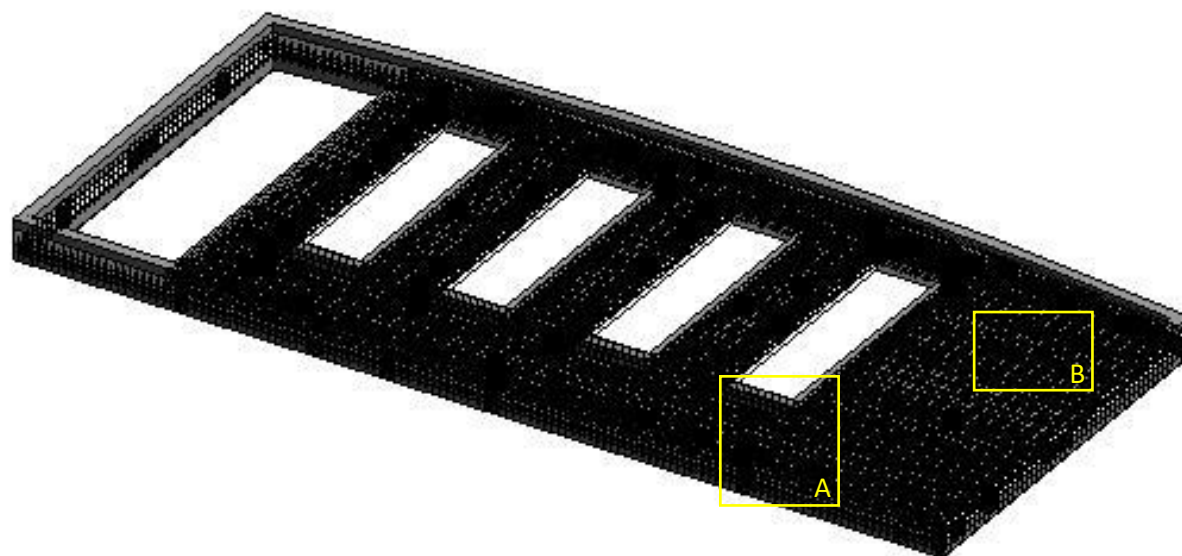


Figura I.34 – Modelos 3D de armaduras – Laje de cobertura do centro de conferências

Lajes 3 – Cobertura Inclinada Sobre a Laje de Cobertura

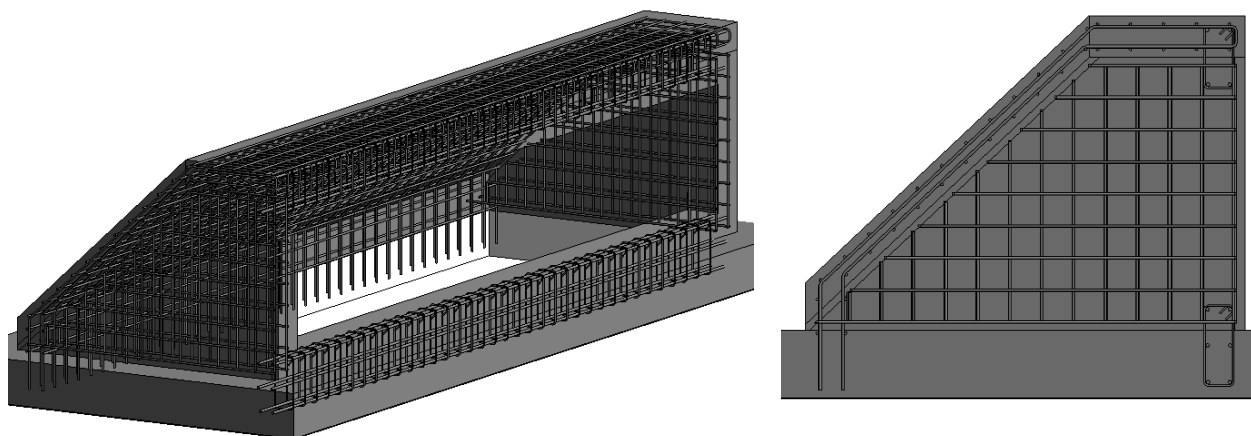


Figura I.35 – Modelos 3D de armaduras – Lajes inclinadas do centro de conferências

Lajes 4 – Lajes Interiores e Patamar de Bancada

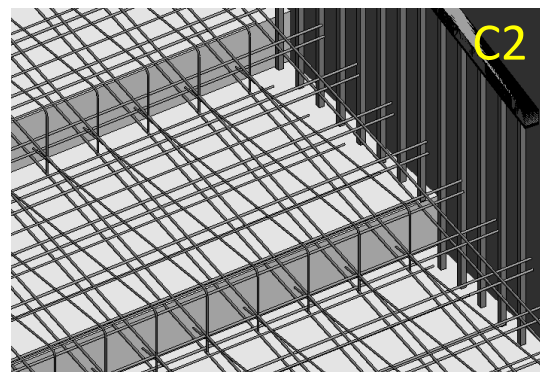
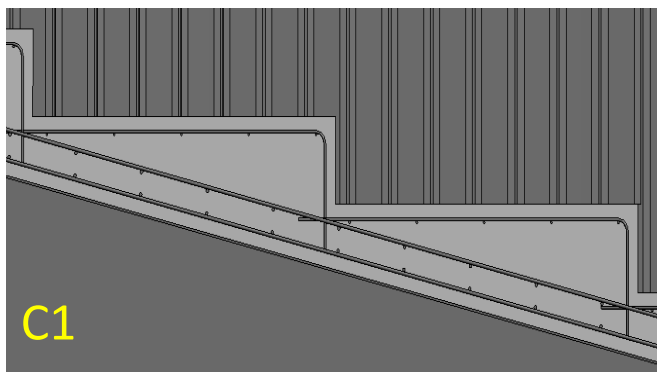
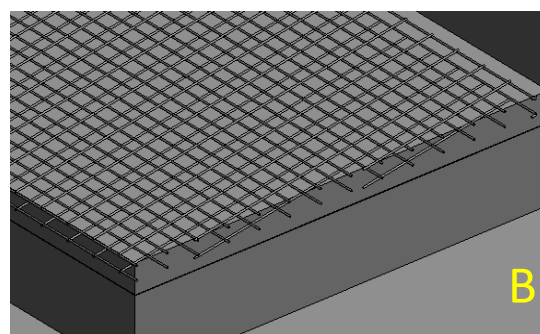
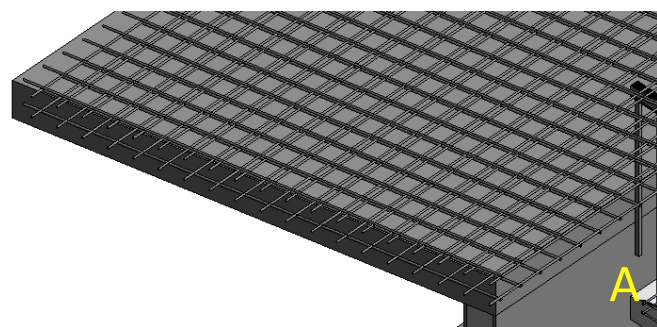
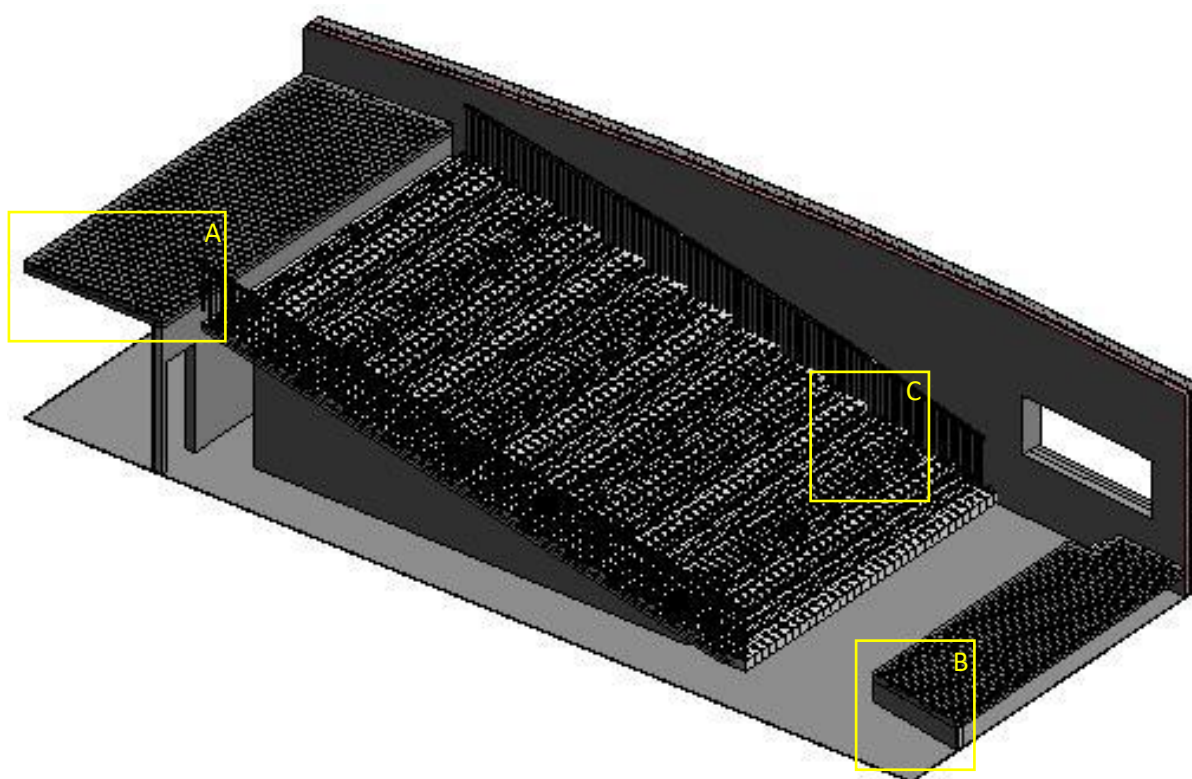


Figura I.36 – Modelos 3D de armaduras – Lajes interiores do centro de conferências

Quantificação e Orçamentação

O custo por metro cúbico de betão assumido é de 76,69 euros, valor aconselhado pela Associação do Industriais da Construção Civil e Obras Públicas (AICCOPN) para um betão C25/30 – S3. Só é assumido o custo do material, existem ainda despesas adicionais relativas à mão de obra e equipamentos.

O custo por quilograma de aço assumido é de 0,77 cêntimos para um diâmetro de 6 milímetros, 0,75 para um $\varnothing 8$, 0,71 para um $\varnothing 10$ e 0,69 cêntimos para os diâmetros de 12, 16 e 20 milímetros. Este custo é uma média em função do tipo de aço, seja ele A400 ou A500, e do comprimento de varão, 6 ou 12 metros, obtido no site *orcamentos.eu*, site dedicado a Orçamentação na área da construção civil.

As áreas de cofragem foram obtidas através do *add-in SOFiSTiK BiMTOOLS 2017*. As áreas de cofragem e volumes de betão assim como os respetivos custos estimados estão separados dos dados estimativos sobre o aço porque o programa não consegue apresentar essa informação tabelada com referência ao elemento que o aloja, mas atribui informação relativa ao tipo, ou seja, é possível extrair a informação em função do tipo de elemento onde o aço se encontra instalado. Tirando proveito dessa capacidade a divisão será feita em função do tipo e do diâmetro.

Tabela I.31 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Sapatas

| Id. | Dimensões (m ³) | Quant. | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) (*) | Custo de Cofragem (€) |
|----------|-----------------------------|--------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| S1 | 2.00 x 2.00 x 1.00 | 8 | 32.00 | 2.454,08 | 62.95 | 1.259,00 |
| S2 | 1.50 x 1.50 x 0.80 | 2 | 3.60 | 276,08 | 9.32 | 186,40 |
| S3 | 1.50 x 1.80 x 0.85 | 18 | 41.31 | 3.168,06 | 99.89 | 1.997,80 |
| S4 | 2.90 x 2.75 x 1.00 | 1 | 7.98 | 611,60 | 11.30 | 226,00 |
| S5 | 5.15 x 4.95 x 0.70 | 1 | 17.84 | 1.368,51 | 14.14 | 282,80 |
| S6 | 2.60 x 3.05 x 0.85 | 2 | 13.48 | 1.033,86 | 19.09 | 381,80 |
| S7 | 3.10 x Var. x 0.90 | 2 | 120.41 | 9.234,52 | 109.79 | 2.195,75 |
| S8 | 5.70 x 4.65 x 0.90 | 1 | 23.85 | 1.829,40 | 18.63 | 372,60 |
| S9 | 2.70 x 1.80 x 0.85 | 2 | 8.26 | 633,61 | 15.18 | 303,60 |
| Σ | | | 268.74 m ³ | 20.609,74 € | 360.29 m ² | 7.205,75 € |

(*) A área de cofragem para sapatas só compreende a área em torno do perímetro das sapatas. Não entra a área referente à face inferior.

Tabela I.32 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Pilares

| Id. | Dimensões (m ²) | Quant. (*) ¹ | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) (*) ² | Custo de Cofragem (€) |
|----------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| P1 | 0.30 x 0.25 | 20 | 5.21 | 399,18 | 75.39 | 1.507,79 |
| P2 | 0.20 x 0.25 | 2 | 0.34 | 25,81 | 6.31 | 126,14 |
| P3 | 1.01 x 0.25 | 42 | 37.65 | 2.887,43 | 378.49 | 7.569,77 |
| P4 | 0.61 x 0.15 | 34 | 10.50 | 805,16 | 169.94 | 3.398,75 |
| Σ | | | 53.69 m ³ | 4.117,58 € | 630.12 m ² | 12.602,46 € |

(*)¹ Metade dos pilares de cada tipo possui um comprimento bruto de 4.21 metros e a restante metade 3.55 metros.

(*)² A área de cofragem é o somatório da área necessária para cofrar as quatro faces expostas de cada pilar.

Tabela I.33 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Vigas

| Id. | Dimensões (m ²) | Quant. (*) ¹ | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) (*) ² | Custo de Cofragem (€) |
|----------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| V1 | 0.20 x 0.60 | 4 | 2.76 | 211,42 | 42.67 | 853.45 |
| V2 | 0.30 x 0.50 | 4 | 4.71 | 361,51 | 67.00 | 1.339.93 |
| V3 | 0.20 x 1.45 | 4 | 13.83 | 1.060,46 | 161.04 | 3.220.77 |
| V4 | 0.20 x 1.25 | 4 | 11.55 | 885,82 | 138.27 | 2.765.34 |
| VE1 | 0.30 x 0.50 | 8 | 1.88 | 144,03 | 55.03 | 1.100.56 |
| VE2 | 0.40 x 0.90 | 5 | 8.71 | 668,33 | 55,39 | 1.107,71 |
| VE3 | 0,30 x 0,65 | 2 | 1.21 | 92,84 | 17,76 | 355,12 |
| Σ | | | 44.65 m ³ | 3.424,42 € | 537.14 m ² | 10.742,88 € |

(*)¹ O número de vigas não corresponde ao total de vãos de cada viga mas sim ao número de elementos que compreende um n número de vãos. Por exemplo, para a viga V2 temos 4 vigas, cada viga dessas possui dois vãos. O comprimento total da viga V2 com os dois vãos é de 15.825 metros, sem contar com as interrupções nas zonas de apoio (nesse caso o comprimento seria de 15.575 metros).

(*)² A área de cofragem é dada em função das três faces livres de cada viga (laterais e face inferior).

Tabela I.34 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Paredes

| Id. | Dimensões (m ²) | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) (*) | Custo de Cofragem (€) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| Bordo | 0.20 | 6.60 | 505,96 | 65.96 | 1319,28 |
| Suporte LM6 | 0.20 | 5.21 | 399,54 | 59.02 | 1180,39 |
| Par1 | 0.20 | 11.39 | 873,59 | 122.25 | 2445,05 |
| Par2 | 0.20 | 22.37 | 1.715,38 | 234.80 | 4695,94 |
| Par3 | 0.20 | 49.57 | 3.801,17 | 529.31 | 10586,27 |
| Par4 | 0.20 | 18.26 | 1.400,12 | 214.99 | 4299,76 |
| Par5 | 0.15 | 2.17 | 166,69 | 32.33 | 646,64 |
| Par6 | 0.15 | 4.13 | 316,61 | 60.15 | 1202,95 |
| Par 7 | 0.33 | 21.21 | 1.626,55 | 162.08 | 3241,65 |
| Σ | | 140.90 m ³ | 10.805,62 € | 1480.90 m ² | 29.617,93 € |

(*) Semelhante ao método de contabilização de áreas em pilares.

A laje LM6 é a laje inclinada no topo da cobertura da estrutura do espaço de conferências, esta é suportada lateralmente e ainda possui a zona frontal em parede, com uma abertura para uma janela. Estas paredes são as que são contabilizadas na linha referente às paredes “Suporte LM6”. O elemento “Bordo” refere-se aos elementos em betão que coroam as coberturas, as platibandas instaladas sobre a viga V3 são um exemplo desses bordos. O espaço de conferências também possui elementos semelhantes.

Tabela I.35 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Escadas

| Id. | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) | Custo de Cofragem (€) |
|----------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|
| LE1 | 3.78 | 289,92 | 41.27 | 825,40 |
| LE2 | 6.27 | 480,96 | 66.19 | 1.323,74 |
| LE3 | 0.08 | 6,05 | 1.39 | 27,77 |
| LM7 | 16.82 | 1.289,80 | 168.44 | 3.368,81 |
| Σ | 26.95 m ³ | 2.066,73 € | 277.29 m ² | 5.545,72 € |

ANEXO I

A área de cofragem para escadas não foi calculada pelo *add-in* e é definida pelos dados referentes aos dados de área material recolhida pelo Revit, sendo uma estimativa mais afastada do que seria desejado. Por algum motivo o *software* não tem compatibilidade com o add-in para elementos de escadas, o Revit possui parâmetros de recolha de dados diferentes para famílias do tipo escada.

Tabela I.36 – Volume de betão, área de cofragem e custo total – Lajes

| Id. | Espessura (m ²) | Área de Laje (m ²) | Volume de betão (m ³) | Custo de Betão (€) | Área de Cofragem (m ²) | Custo de Cofragem (€) |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Laje Térrea | 0.20 | 474.61 | 94.92 | 7.279,49 | 47.37 | 947,31 |
| LM1 Cob. | 0.22 | 399.30 | 87.85 | 6.736,85 | 449.80 | 8.996,09 |
| LM1 piso | 0.22 | 406.10 | 89.34 | 6.851,62 | 429.58 | 8.591,68 |
| LM1 Var. Cob. | 0.15 | 66.15 | 9.92 | 760,93 | 100.32 | 2.006,35 |
| LM1 Var. Piso | 0.22 | 51.71 | 11.38 | 872,42 | 93.05 | 1.860,99 |
| LM2 Cob. | 0.25 | 4.68 | 1.17 | 89,76 | 8.97 | 179,37 |
| LM3 | 0.15 | 19.98 | 3.00 | 229,79 | 22.70 | 453,96 |
| LM4 Cob. | 0.30 | 104.82 | 31.44 | 2.411,48 | 145.97 | 2.919,31 |
| LM4 Piso | 0.30 | 156.68 | 47.00 | 3.604,78 | 179.12 | 3.582,32 |
| LM5 | 0.15 | 34.20 | 5.13 | 393,42 | 54.16 | 1.083,23 |
| LM6 | 0.185 | 56.99 | 10.54 | 808,59 | 92.34 | 1.846,80 |
| LM8 | 0.20 | 21.16 | 4.23 | 324,62 | 25.29 | 505,70 |
| LM9 | 0.15 | 11.18 | 1.68 | 128,61 | 13.57 | 271,30 |
| Palas | 0.15 | 145.62 | 21.84 | 1.675,08 | 146.08 | 2.921,65 |
| Σ | | | 419.44 m ³ | 32.166,90 € | 1808.32 m ² | 36.166,40 € |

Varanda (Var.); Cobertura (Cob.).

A recolha de dados para o montante das áreas de cofragem para lajes é semelhante ao das vigas, cálculo em função da face inferior e bordos livre, com exceção da laje térrea que só precisa da área referente às laterais. O cálculo para a área de cofragem da laje térrea teve de ser corrigido manualmente uma vez que o *add-in* não é capaz de identificar essa laje como um elemento térreo, como faz com as sapatas.

Tabela I.37 – Quantificação de betão e cofragem – Totais

| Volume de betão | Custo de Betão | Área de Cofragem | Custo de Cofragem |
|-----------------------|----------------|------------------------|-------------------|
| 954.37 m ³ | 73.190,60 € | 5094.04 m ² | 101.880,85 € |

Esta estimativa compreende os volumes para a superestrutura e as respetivas fundações, o custo associado é próximo dos 73 mil euros e só é possível assumir que possa existir um erro uma vez que, por motivos alheios à empresa, não foi possível obter os dados respeitantes às quantidades finais e custos associados à estrutura.

Ainda assim é assumido que possa existir um erro de cerca de 10% dos volumes de betão, este valor é alcançado comparando o volume determinado pelo programa para os elementos de barra com o volume determinado manualmente para esses mesmos elementos. O erro destes volumes anda na ordem dos 9 a 11 por cento, é assumida a média. Mas este acréscimo pode ser excessivo uma vez que o programa define os volumes em função da geometria tridimensional dos elementos e retira aos elementos barra os volumes onde exista sobreposição de elementos, ou seja, se a viga ou o pilar forem interrompidos por uma laje ou parede o programa não irá contabilizar o volume correspondente a esse pedaço de viga ou pilar análogo à espessura do elemento que o intersecta.

Os valores correspondentes aos custos de cofragem estão calculados por excesso e este pode ser superior ao real uma vez que para o cálculo não é contabilizada a possibilidade de uma cofragem vir a ser utilizada mais do que uma vez em obra. Este custo assume o uso de cofragens individuais para cada elemento a ser betonado em obra. O custo por metro quadrado de cofragem utilizado foi de 20 euros, este valor foi definido em função de uma média de valores de orçamentação que varia entre os 12 e os 26 euros por metro quadrado, assumiu-se o valor médio, ver ponto 4.2 do relatório.

Tabela I.38 – Quantificação de aço – Sapatas

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------|-------------|
| ø6 | 288.78 | 0.008 | 64.1 | 49.35 |
| ø12 | 2459.45 | 0.278 | 2183.54 | 1506.64 |
| ø16 | 7075.09 | 1.423 | 11166.88 | 7705.14 |
| ø20 | 1187.00 | 0.373 | 2927.32 | 2019.85 |
| Σ | 11010.32 m | 2.082 m ³ | 16341.84 kg | 11.280,98 € |

Tabela I.39 – Quantificação de aço – Pilares

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------|------------|
| ø6 | 9339.06 | 0.264 | 2072.84 | 1596.09 |
| ø12 | 1342.31 | 0.152 | 1191.72 | 822.29 |
| ø16 | 190.12 | 0.039 | 300.07 | 207.05 |
| ø20 | 3878.51 | 1.219 | 9564.99 | 6599.84 |
| Σ | 14750.00 m | 1.674 m ³ | 13129.62 kg | 9.225,27 € |

Tabela I.40 – Quantificação de aço – Vigas

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|------------|------------|
| ø8 | 6587.92 | 0.331 | 2599.49 | 1949.61 |
| ø12 | 446.97 | 0.051 | 396.83 | 273.81 |
| ø16 | 1186.16 | 0.238 | 1872.16 | 1291.79 |
| ø20 | 615.42 | 0.193 | 1517.71 | 1047.23 |
| Σ | 8836.47 m | 0.813 m ³ | 6386.19 kg | 4.562,44 € |

Tabela I.41 – Quantificação de aço – Paredes

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------|-------------|
| ø8 | 856.08 | 0.043 | 337.80 | 253.35 |
| ø10 | 1969.92 | 0.154 | 1214.53 | 862.32 |
| ø12 | 15278.74 | 1.728 | 13564.68 | 9359.62 |
| ø16 | 238.88 | 0.048 | 377.03 | 260.15 |
| ø20 | 1215.83 | 0.382 | 2998.42 | 2068.91 |
| Σ | 19559.45 m | 2.355 m ³ | 18492.46 kg | 12.804,35 € |

Tabela I.42 – Quantificação de aço – Escadas

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|-----------|------------|
| Ø6 | 1262.66 | 0.036 | 280.25 | 215.79 |
| Ø8 | 1751.40 | 0.088 | 691.07 | 518.30 |
| Ø10 | 568.44 | 0.045 | 350.46 | 248.83 |
| Ø12 | 439.21 | 0.050 | 389.94 | 269.06 |
| Σ | 4021.70 | 0.219 | 1711.72 | 1.251,98 € |

Tabela I.43 – Quantificação de aço – Lajes – A400

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Ø8 | 3313.38 | 0.167 | 1307.41 | 980.56 |
| Ø10 | 3621.59 | 0.284 | 2232.85 | 1585.32 |
| Ø12 | 46268.43 | 5.233 | 41077.76 | 28343.65 |
| Ø16 | 742.60 | 0.150 | 1172.07 | 808.73 |
| Ø20 | 3007.30 | 0.945 | 7416.45 | 5117.35 |
| Σ | 56953.30 m | 6.779 m ³ | 53206.54 kg | 36.835,61 € |

Tabela I.44 – Quantificação de aço – Lajes – A500

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|------------|-----------|
| Ø12 | 9006.60 m | 1.019 m ³ | 7996.19 kg | 5517.37 € |

Tabela I.45 – Quantificação de aço – Total

| Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Volume (m ³) | Peso (kg) | Custo (€) |
|---------------|-----------------|--------------------------|--------------|-------------|
| Ø6 | 10890.50 | 0.308 | 2417.19 | 1861.23 |
| Ø8 | 12508.78 | 0.629 | 4935.77 | 3701.82 |
| Ø10 | 6159.95 | 0.483 | 3797.84 | 2696.47 |
| Ø12 | 75241.70 | 8.511 | 66800.66 | 46092.44 |
| Ø16 | 9432.85 | 1.898 | 14888.21 | 10272.86 |
| Ø20 | 9904.06 | 3.112 | 24424.89 | 16853.18 |
| Σ | 124137.84 m | 14.941 m ³ | 117264.56 kg | 81.478,00 € |

Os resultados apontam para um valor estimativo de 81,5 mil euros, mas a modelação não seguiu à risca todas as indicações de amarração de varões, nem foram aplicados com exatidão todos os elementos e possíveis armaduras de pormenor existentes. Estas simplificações devem-se a facto de ser necessário despendar muito tempo na modelação, principalmente de elementos mais complexos como é o caso das paredes de suporte do anfiteatro.

Como não foi possível aceder aos dados de obra não é possível estimar o desfasamento entre os resultados obtidos e os valores reais. O uso dos dados reais também poderia ajudar a definir qual o parâmetro que mais se ajusta à definição do erro, se seria preferível ajustar pelo comprimento e definir qual a quantidade de varões de 12 ou 6 metros de cada tipo, estimando o custo a partir desse valor ou seguir pelo volume ou peso. Claro que mesmo com os resultados desta obra, esses valores poderiam não ser determinantes, seria mais vantajoso reunir um conjunto de casos e retirar conclusões em função dos mesmos. Talvez dessa forma também fosse possível determinar se existe alguma vantagem na modelação ao pormenor das armaduras ou se um método simplificado como o que é aplicado no terceiro caso de estudo serviria o propósito, seja esse o de estimar quantidades e orçamentar ou de encontrar possíveis problemas de compatibilidade.

Convém referir que estes orçamentos não contabilizam elementos adicionais de apoio à montagem de armaduras, como é o caso dos espaçadores ou dos caranguejos. A introdução deste tipo de elementos, principalmente dos espaçadores, num modelo tridimensional pode ser mais desvantajosa para o modelador do que o inverso.

ANEXO II – CASO DE ESTUDO 3

Enquadramento

A estrutura em estudo trata-se de um edifício residencial com rés-do-chão e 4 andares elevados localizado no concelho de Castelo Branco.

A cota de implantação do bloco de apartamentos situa-se aos 450 metros de altitude em relação ao nível do mar.

O terreno de implantação corresponde ao tipo D, categorizado segundo o EC8. Isto significa que o solo de fundação é composto por material de consistência predominantemente mole coesiva ou não coesiva.

Sendo este um edifício corrente de habitação, a classe de importância do mesmo é a II.

A altura entre pisos é de 3,15 metros e a cobertura do mesmo é acessível.

Os materiais estruturais considerados para a execução da obra são:

- Betão de classe C20/25;
- Varões de Aço da classe A400.

Os elementos estruturais presentes na estrutura são:

- Pavimentos maciços e consolas em betão armado;
- Pilares e Vigas de betão armado;
- Paredes de betão armado.

A composição dos materiais não estruturais constituintes dos diversos elementos estruturais são os seguintes:

- Cobertura
 - o Lajetas de betão com 5 cm de espessura;
 - o Geotêxtil; o Isolante térmico;
 - o Tela de impermeabilização;
 - o 2 cm de betonilha;
 - o Camada de forma em betão leve com 12 cm (média).
 - o Reboco de estuque projetado com 2 cm.

ANEXO II

- Varandas
 - o Tijoleira cerâmica tradicional com 1,5 cm;
 - o Cimento cola, 0,5 cm; o Betonilha hidrofugada com 4 cm;
 - o Guarda em betão armado à vista, 12 cm de espessura e 1 metro de altura;
 - o Reboco areado com 2 cm.
- Pavimentos interiores
 - Tijoleira cerâmica tradicional com 1,5 cm;
 - Cimento cola, 0,5 cm;
 - Betonilha com 2 cm;
 - 10 cm de betão leve; o Manta acústica, 10 mm;
 - Reboco de estuque projetado com 2 cm.
- Paredes exteriores
 - Reboco exterior de argamassa de cimento hidrofugado pintado, 4 cm;
 - Parede dupla de tijolo furado de 15 + 7 com isolante intermédio;
 - Reboco interior de estuque projetado com 1,5 cm.
- Paredes divisórias interiores
 - Parede de tijolo furado de 7;
 - Reboco de estuque projetado, 1,5 cm em ambas as faces.
- Paredes de separação
 - Parede dupla de tijolo furado de 15 + 7 com isolante intermédio;
 - Reboco de estuque projetado, 1,5 cm em ambas as faces.
- Escadas e patamares
 - Degraus revestidos a marmorite, 2 cm, piso e espelho;
 - Betonilha, 2 cm;
 - Reboco de estuque projetado, 2 cm.

Com estas informações foi possível desenvolver um pré-dimensionamento da estrutura.

Ações

Na fase de pré-dimensionamento da estrutura não foram consideradas combinações sísmicas, limitando o número de combinações iniciais. As combinações utilizadas foram:

- Estados Limites Últimos

$$P_{Ed} = 1.35 * G_k + 1.5 * Q_{k,i} + \Sigma(1.5 * \psi_{0,j} * Q_{k,j})$$

- Estados Limites de Deformação (Estado Limite de Serviço, ações Quase-Permanentes (ELS QP))

$$P_{Ed} = G_k + \Sigma(\psi_{2,i} * Q_{k,i})$$

P_{Ed} Valor de cálculo dos efeitos das ações;

G_k Ações permanentes;

$Q_{k,i}$ Sobrecargas;

$\psi_{i,j}$ Coeficiente de redução das ações.

Vento

A ação do vento foi calculada segundo o EC1 parte 4 e fica definida da seguinte forma:

Tabela II.1 – Valores simplificados para cálculo da pressão dinâmica de pico

| Acção do vento (ZA e CIII) | |
|----------------------------|-------|
| Cdir | 1 |
| Cseason | 1 |
| Vb,0 (m/s) | 27 |
| Vb (m/s) | 27 |
| qb (kN/m ²) | 0,46 |
| Z (m) | 15,75 |
| Ce | 2,00 |
| qp (kN/m ²) | 0,91 |

Fica assumido que o edifício se situa num terreno da categoria III, cobertura regular de edifícios e/ou vegetação, zona suburbana. Isto é feito para agravar ligeiramente a pressão do vento porque desconhecemos a zona de implantação, assumir que esta será no centro da cidade pode ser um erro já que um edifício novo pode fazer parte do plano de expansão da cidade e este pode estar projetado para a periferia da mesma.

Assume-se também uma cobertura plana com platibandas de 1 metro de altura, já que está estipulado um acesso livre à cobertura por parte dos habitantes do prédio.

ANEXO II

Também é considerada uma simplificação do cálculo da ação do vento sobre a fachada, assumido que este terá uma planta retangular regular. Não são consideradas as reentrâncias existentes.

Mesmo no modelo estas ações entram de forma simplificada para agilizar o processo de aplicação das cargas. Entrando com os diversos valores de carga, apenas não os aplicando de forma inteiramente exata.

Por exemplo, um dos valores seria aplicado numa faixa de 3 metros, como a estrutura não é um retângulo perfeito esta força será aplicada de forma irregular em planta e o comprimento da faixa de aplicação pode ser ligeiramente superior a 3 metros, mas nunca aplicada a toda a extensão.

Tentou-se respeitar o máximo possível as larguras de aplicação, procurando mantê-las próximas dos valores regulamentares.

Sendo assim, os valores de pressão exercidos na estrutura são os seguintes:

Tabela II.2 – Pressão Superficial Exterior (w_e) na cobertura em terraço

| Com Platibanda | | | F | G | H | I |
|----------------|-------|--------------|-------|-------|-------|------|
| h | 15,75 | Cpe1 | -1,4 | -0,9 | -0,7 | 0,2 |
| hp | 1 | Cpe10 | -2 | -1,6 | -1,2 | 0,2 |
| hp/h | 0,06 | Cpe | -2 | -1,6 | -1,2 | 0,2 |
| qp(z) | 0,918 | we | -1,84 | -1,47 | -1,10 | 0,18 |

Tabela II.3 – Pressão Superficial Exterior (w_e) na Fachada XZ

| Fachada XZ | | | A | B | D | E |
|------------|-------|--------------|-------|-------|------|-------|
| h | 15,75 | Cpe1 | -1,4 | -1,1 | 1 | -0,51 |
| b | 21,4 | Cpe10 | -1,2 | -0,8 | 0,8 | -0,51 |
| d | 14 | Cpe | -1,4 | -1,1 | 1 | -0,51 |
| h/d | 1,125 | we | -1,28 | -1,01 | 0,92 | -0,47 |

Tabela II.4 – Pressão Superficial Exterior (w_e) na Fachada YZ

| Fachada YZ topo | | | A | B | C | D | E |
|-----------------|-------|--------------|-------|-------|-------|------|-------|
| h | 15,75 | Cpe1 | -1,4 | -1,1 | -0,5 | 1 | -0,51 |
| b | 14 | Cpe10 | -1,2 | -0,8 | -0,5 | 0,8 | -0,51 |
| d | 21,4 | Cpe | -1,4 | -1,1 | -0,5 | 1 | -0,51 |
| h/d | 0,74 | we | -1,28 | -1,01 | -0,46 | 0,92 | -0,47 |

Neve

Seguindo as regras de cálculo do EC1 parte 3. O valor da pressão da neve na zona de Castelo Branco é:

Tabela II.5 – Pressão exercida pela neve em Castelo Branco

| Acção da neve (Z1) | |
|-------------------------|------|
| μ | 0,8 |
| Ce | 1 |
| Ct | 1 |
| Cz | 0,3 |
| H (m) | 450 |
| Sk (kN/m ²) | 0,54 |
| S (kN/m ²) | 0,43 |

Materiais

A nível de pesos dos materiais temos as seguintes tabelas com os valores utilizados no dimensionamento.

Tabela II.6 – Pesos Específicos dos materiais

| Cobertura | | | Varandas | | | Pavimentos Interiores | | |
|--------------------------------------|------|----------------------------------|---------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------|-------|-------------------------------|
| Composição | | γ (kN/m ³) | Composição | | γ (kN/m ³) | Composição | | γ (kN/m ³) |
| Lajetas de Betão | 5cm | 24 | Tijoleira Cerâmica | 1,5cm | 0,3 kN/m ² | Tijoleira Cerâmica | 1,5cm | 0,3 kN/m ² |
| Geotêxtil | — | 0,003 kN/m ² | Cimento Cola | 0,5cm | | Cimento Cola | 0,5cm | |
| Isolante Térmico | 6cm | 0,3 | Betonilha Hidrófuga | 4cm | 20 | Betonilha | 4cm | 20 |
| Telas de Impermeabilização | — | 0,15 kN/m ² | Laje Maciça | | 25 | Betão Leve | 10cm | 10 |
| Betonilha | 2cm | 20 | Reboco Areado | 2cm | 21 | Manta Acústica | 10mm | 0,32 |
| Betão Leve | 12cm | 10 | Guarda em BA | 12cm x 1m | 25 | Laje Aligeirada | | 14/17 |
| Laje Aligeirada com Blocos Cerâmicos | | 14/17 | | | | Reboco Estuque | 2cm | 12 |
| Reboco Estuque | 2cm | 12 | | | | | | |

| Paredes Exteriores | | | Paredes Divisórias Interiores | | | Paredes de Separação | | |
|------------------------------------------------|----------|----------------------------------|-------------------------------|-------|----------------------------------|------------------------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Composição | | γ (kN/m ³) | Composição | | γ (kN/m ³) | Composição | | γ (kN/m ³) |
| Reboco Exterior Hidrófugo | 4cm | 21 | Reboco Estuque | 1,5cm | 1,20 kN/m ² | Reboco Estuque | 4cm | 12 |
| Parede Dupla de Tijolo Furado c/Isolante (6cm) | (15+7)cm | 2,7 kN/m ² + 0,3 | Parede de Tijolo Furado | 7cm | | Parede Dupla de Tijolo Furado c/Isolante (6cm) | (15+11)cm | 3,2 kN/m ² + 0,3 |
| Reboco Estuque | 1,5cm | 12 | Reboco Estuque | 1,5cm | | Reboco Estuque | 1,5cm | 12 |

| Escadas e Patamares | | |
|---------------------|-----|----------------------------------|
| Composição | | γ (kN/m ³) |
| Marmorite | 2cm | 25 |
| Betonilha | 2cm | 20 |
| Laje Maciça | | 25 |
| Reboco Estuque | 2cm | 12 |

| | | |
|---------------|-----------|-------------------|
| tijolo furado | 1100-1400 | kg/m ³ |
| | 10,8-13,7 | kN/m ³ |

| | | |
|----------------|-----------|-------------------|
| Manta acústica | 23-32 | kg/m ³ |
| | 0,23-0,32 | kN/m ³ |

| | | |
|-----------|-------|-------------------|
| Geotêxtil | 0,3 | kg/m ² |
| | 0,003 | kN/m ² |

ANEXO II

O valor utilizado para o tijolo furado foi um valor médio de 12,25 kN/m³, na manta acústica utilizou-se o mais pesado.

Tabela II.7 – Valores utilizados na contabilização das cargas permanentes

| | |
|------------------------------|------------------------|
| Cobertura | 3,21 kN/m ² |
| Varandas | 1,52 kN/m ² |
| Pavimentos Interiores | 2,34 kN/m ² |
| Paredes Exteriores | 3,74 kN/m ² |
| Paredes Divisórias | 1,20 kN/m ² |
| Paredes de Separação | 3,88 kN/m ² |
| Escadas e Patamares | 1,14 kN/m ² |

Utilização

A sobrecarga de utilização considerada foi de:

- 2 kN/m², zonas interiores privativas e cobertura;
- 3 kN/m², Escadas e zonas comuns do prédio;
- 5 kN/m², faixa de 1 metro nas consolas a contar do bordo livre.

Os coeficientes de redução das sobrecargas são os seguintes:

Tabela II.8 – Valores regulamentares do coeficiente de redução de sobrecarga

| Sobrecargas ECO | Utilização | Vento | Neve |
|-----------------|------------|-------|------|
| ψ0 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| ψ1 | 0,5 | 0,2 | 0,2 |
| ψ2 | 0,3 | 0 | 0 |

Sísmica

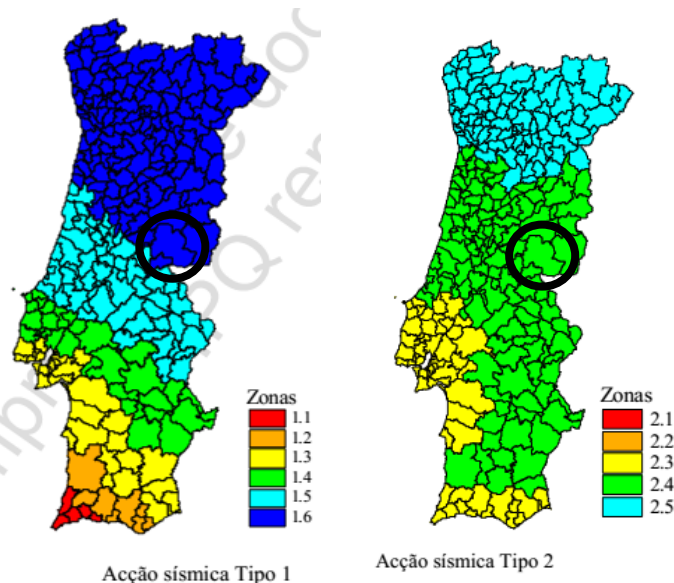
A análise sísmica realizada teve como base regulamentar o EC8-1.

Para fazer uma análise sísmica é necessário conhecer quais as acelerações do terreno para ambos os tipos de ação sísmica no terreno, assim como o coeficiente de comportamento a aplicar no cálculo sísmico.

Os dados relativos à zona sísmica do Concelho de Castelo Branco são os seguintes:

Tabela II.9 – Dados Sísmicos e localização de Castelo Branco

| | | | |
|--------------------------------------------|--------------|----------------------|-------|
| EuroCódigo 8 | Região | Portugal Continental | |
| Município | Tipo de Solo | Classe de Imp. | |
| Castelo Branco | D | II | |
| Código do Município | | | |
| 502 | | | |
| Sismo Tipo 1 | | Sismo Tipo 2 | |
| Zona Sísmica | 1.6 | Zona Sísmica | 2.4 |
| agR (m/s2) | 0,35 | agR (m/s2) | 1,1 |
| Y _I | 1 | Y _I | 1 |
| Valores Característicos - Solo de Fundação | | | |
| Smax | 2 | Smax | 2 |
| TB (s) | 0,1 | TB (s) | 0,1 |
| TC (s) | 0,8 | TC (s) | 0,3 |
| TD (s) | 2 | TD (s) | 2 |
| Valores de Cálculo | | | |
| ag (m/s2) | 0,35 | ag (m/s2) | 1,1 |
| s | 2 | s | 1,967 |
| η | 1 | η | 1 |



Castelo branco é um concelho que se localiza, para ambos os tipos de ação sísmica, numa zona mais benéfica, ou seja, mais afastada dos epicentros sísmicos.

Contudo os valores de aceleração sísmica não deixam de ser relevantes e podem ser condicionantes para o dimensionamento estrutural.

O coeficiente de comportamento para ações sísmicas horizontais é definido pela seguinte expressão:

$$q = q_0 * k_w \geq 1,5$$

Onde

$$q_0 = 3,0 * \frac{\alpha_{II}}{\alpha_I}$$

O valor q_0 , coeficiente de comportamento básico, é estimado considerando que se trata de um sistema porticado com ductilidade média (DCM).

ANEXO II

Sabendo que o edifício tem vários pisos e pórticos mistos com vários tramos, o EC8 define o valor de $\frac{\alpha_{II}}{\alpha_I}$ como 1,3, para estruturas regulares em planta. No estudo realizado à estrutura concluiu-se que esta não verifica essa regularidade, isto faz com que o valor passe a ser a média entre 1 e 1,3, logo, 1,15.

α_I é o valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para ser atingida pela 1ª vez a resistência à flexão em qualquer elemento da estrutura.

α_{II} é o valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para formar rótulas plásticas num número de secções suficiente para provocar a instabilidade global da estrutura. Este pode ser obtido através de uma análise Pushover.

k_w é igual a 1, valor definido para estruturas porticadas.

Existe ainda outra particularidade no cálculo do coeficiente de comportamento. Como a estrutura também é irregular em altura, o coeficiente a utilizar terá de ser reduzido. O que o EC8 nos indica é que o valor de referência deve ser multiplicado por 0,8.

O valor do coeficiente de comportamento a aplicar será então:

$$q = 3,0 * 1,15 * 1 * 0,8 = 2,76$$

Resultados do Pré-Dimensionamento

Lajes

- Zonas Privativas – espessura de 25 cm;
- Zonas Comuns e escadas – espessura de 20 cm;
- Consolas – espessura de 16 cm;
- Cobertura – espessura de 23 cm.

No modelo original as lajes do interior dos apartamentos e as da cobertura eram aligeiradas, aqui optou-se por atribuir modelos de laje maciça armada nas duas direções a todas as situações. Por conveniência manteve-se a espessura das lajes originalmente pré-dimensionadas.

O dimensionamento das lajes, mesmo com as ações sísmicas, é feito para os ELU. Os elementos de laje, numa situação sísmica, transmitem os esforços horizontais para os pilares e assume-se que a rigidez que o dimensionamento aos ELU atribui, em situação de verificação de segurança às cargas verticais, é suficiente para garantir o correto encaminhamento dessas cargas horizontais.

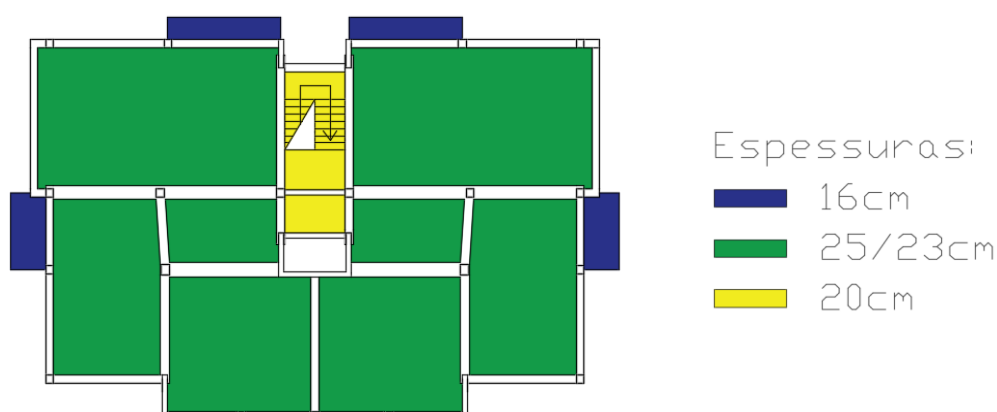


Figura II.1 – Identificação do tipo de laje em planta

Vigas

Existem várias secções de viga estudadas. Para facilitar e reduzir o tipo de vigas a implementar, no modelo só foram aplicados 6 tipos de viga.

- 30 x 40 cm², aplicada na contorno de uma das fachadas;
- 30 x 30 cm², aplicada na maioria das fachadas do edifício e em algumas zonas interiores, embebidas nas paredes;
- 20 x 20 cm², embebidas nas lajes de patamar de escadas, junto ao elevador e na fachada;
- 55 x 25 cm²; 50 x 25 cm²; 35 x 25 cm², vigas interiores embebidas nas lajes aligeiradas.

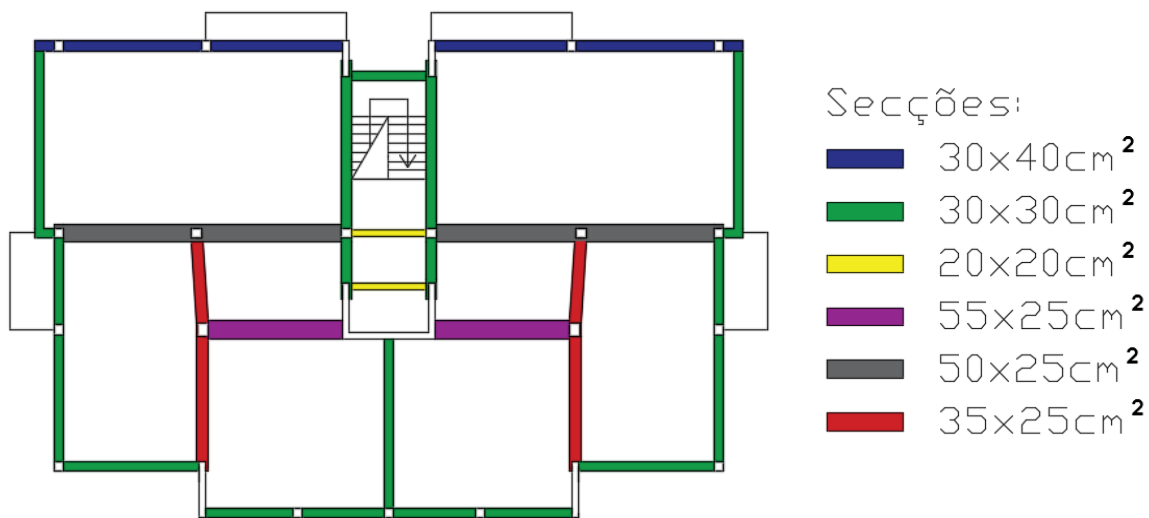


Figura II.2 – Identificação do tipo de viga em planta

Pilares e Paredes

A maioria dos pilares possui uma secção de 30 x 30 cm², com a exceção de dois pilares por piso que têm uma secção de 40 x 30 cm².

A paredes tem sempre 20 cm de espessura, mas desenvolvimentos diferentes.

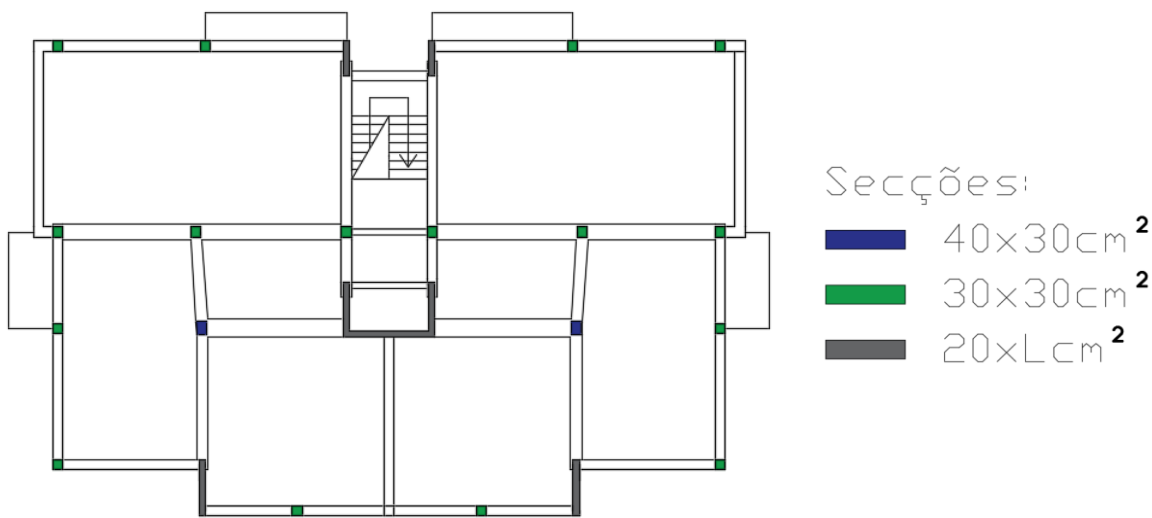


Figura II.3 – Identificação do tipo de pilar em planta

Dimensionamento e Modelação

Modificação do modelo de cálculo e de secções

No decorrer do estudo da estrutura chegou-se à conclusão que era necessário atribuir novas secções aos pilares e adicionar contraventamentos metálicos à estrutura, para que fosse possível atribuir soluções de armadura compatíveis com os limites regulamentares de área máxima de aço num elemento.

Para o modelo final foram aplicados contraventamentos idealizados com perfis metálicos IPE 360, aço S275, em algumas das fachadas e colocadas secções de betão armado de $40 \times 60 \text{ cm}^2$ e de $50 \times 50 \text{ cm}^2$.

Foi também alterada a classe de betão dos pilares de C20/25 para C25/30 e o tipo de aço de A400 para A500.

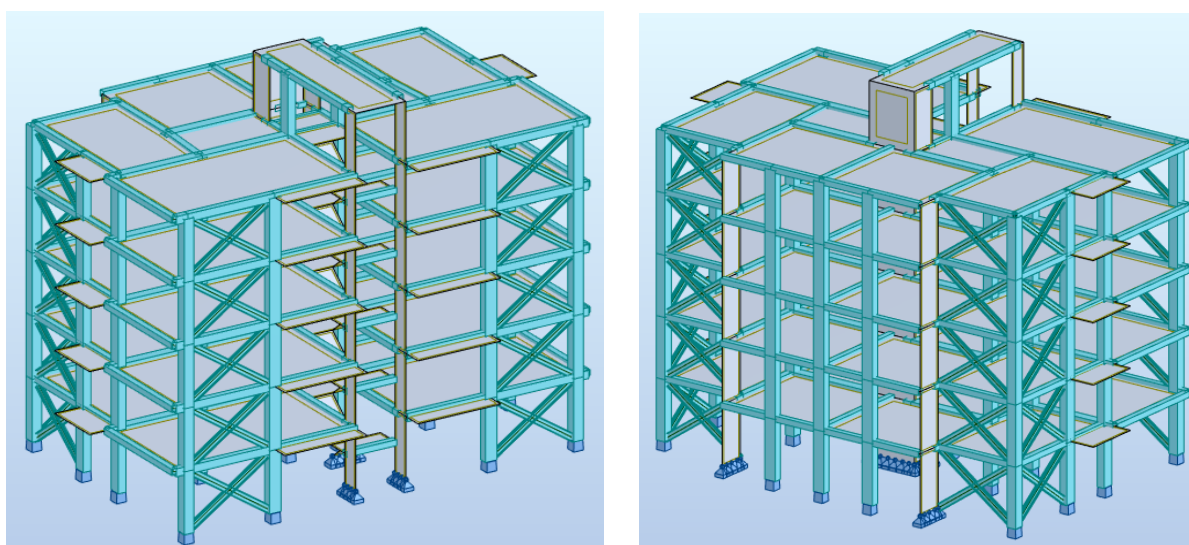


Figura II.4 – Modelo de cálculo final

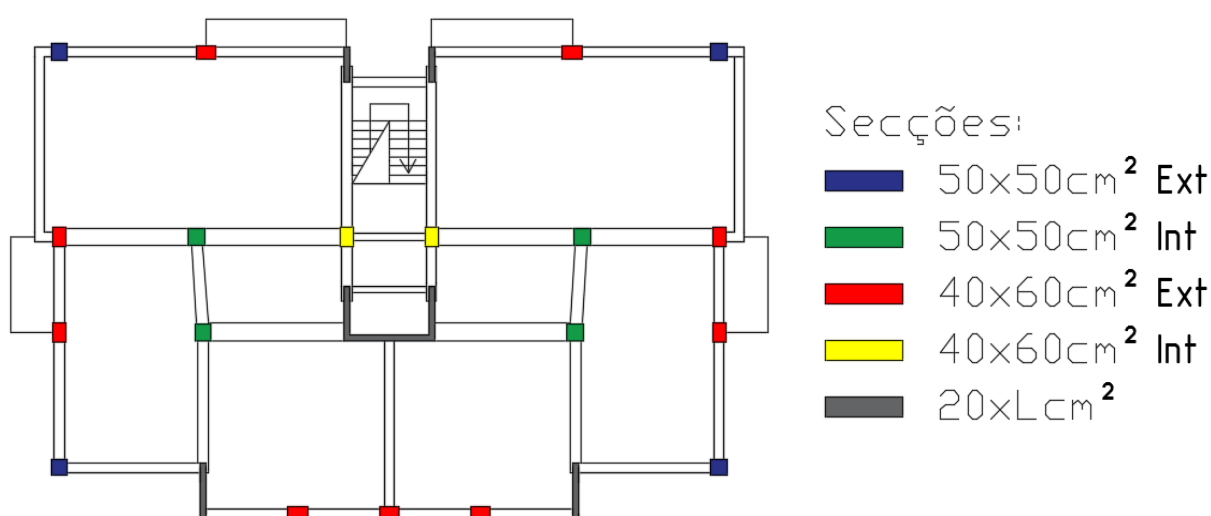


Figura II.5 – Nova distribuição de secções de pilares de betão armado

Lajes

Tabela II.10 – Soluções de armadura em lajes

| Espessura | Armadura | |
|-----------|------------------|------------------|
| | Superior | Inferior |
| 25 cm | # Ø16 // 0,125 m | # Ø16 // 0,100 m |
| 23 cm | # Ø16 // 0,150 m | # Ø16 // 0,200 m |
| 20 cm | # Ø16 // 0,100 m | # Ø16 // 0,125 m |
| 16 cm | # Ø20 // 0,125 m | # Ø16 // 0,250 m |

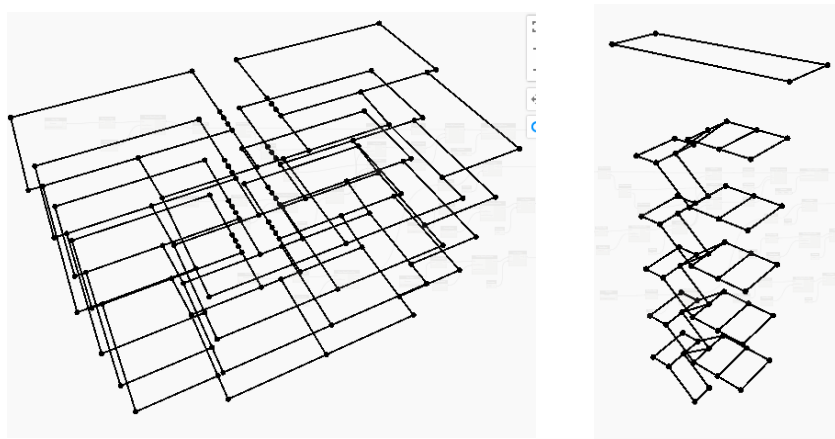
Tabela II.11 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes

| Espessura | MXX (kN*m/m) | | | | MYY (kN*m/m) | | | |
|-----------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | <i>Top</i> | M_{Rd}/M_{Sd} | <i>Bottom</i> | M_{Rd}/M_{Sd} | <i>Top</i> | M_{Rd}/M_{Sd} | <i>Bottom</i> | M_{Rd}/M_{Sd} |
| 25 cm | 88 | 1,210 | 76 | 1,212 | 106 | 1,005 | 109 | 1,085 |
| 23 cm | 61 | 1,210 | 32 | 1,823 | 80 | 1,014 | 61 | 1,028 |
| 20 cm | 69 | 1,207 | 36 | 1,978 | 86 | 1,098 | 72 | 1,092 |
| 16 cm | 45 | 1,317 | 11 | 2,421 | 68 | 1,109 | 31 | 1,003 |

Tabela II.12 – Orçamentação

| Espessura | Betão | | Cofragem | | Armaduras | |
|-----------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Volume | Custo | Área | Custo | Peso | Custo |
| 25 cm | 255,10 m ³ | 18 732,34 € | 1020,40 m ² | 20 408,00 € | 57527,93 kg | 39 694,27 € |
| 23 cm | 58,67 m ³ | 4 308,44 € | 255,10 m ² | 5 102,00 € | 9365,8 kg | 6 462,40 € |
| 20 cm | 22,02 m ³ | 1 616,71 € | 110,08 m ² | 2 201,66 € | 5930,06 kg | 4 091,74 € |
| 16 cm | 13,84 m ³ | 1 016,29 € | 86,50 m ² | 1 730,00 € | 4103,51 kg | 2 831,42 € |
| Σ | 349,63 m³ | 25 673,78 € | 1472,08 m² | 29 441,66 € | 76927,3 kg | 53 079,83 € |

Neste caso de estudo foram perceptíveis as limitações do *add-in* criado para a modelação de armaduras longitudinais e das respetivas lajes. Os problemas resumem-se à existência de algumas lajes inclinadas, os lanços de escadas, e lajes dos pavimentos interiores com ângulos agudos e obtusos nos cantos. Também existe um problema com algumas lajes interiores que, em teoria, seriam compatíveis com o programa desenvolvido, o que acontece é que a definição do contorno de algumas lajes foi feito considerando alguns pontos extra para compatibilização das malhas, isto fez com que os dados das coordenadas que são importados reconheçam esses pontos extra. O Dynamo não se apercebe que esses pontos não são necessários para o modelo estrutural e contabiliza essa informação seccionando a aresta em múltiplos segmentos, gerando erros na aplicação do *add-in*.

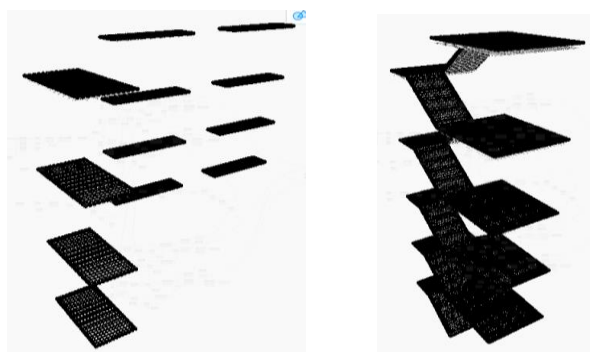


a) Lajes c/arestas segmentadas

b) Lajes inclinadas

Figura II.6 – Ilustração representativa de problemas em Dynamo

Estes problemas impossibilitaram o uso do *add-in* de modelação de armaduras para as lajes dos pavimentos interiores e foram modelados esses elementos com recurso à ferramenta *Area* do Revit. Os lanços de escada não têm modelo de laje, mas ainda assim foram criados modelos de armadura para os mesmos a partir do *add-in*, ficando as armaduras a planar no modelo.



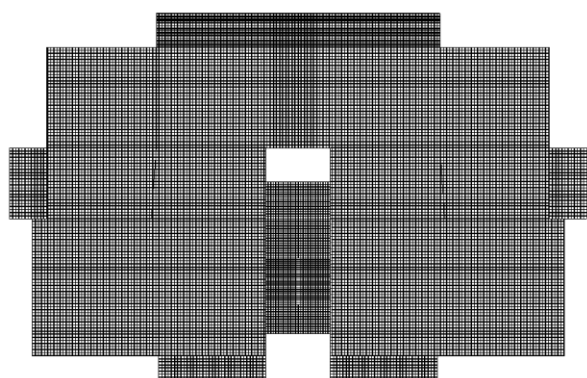
a) Lajes 16 cm

b) Lajes de 20 cm

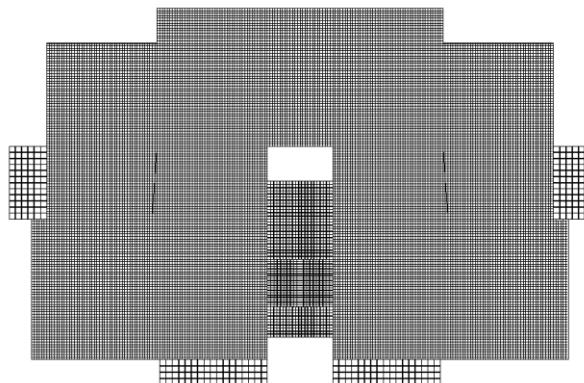
Figura II.7 – Modelação de armaduras pelo Dynamo

ANEXO II

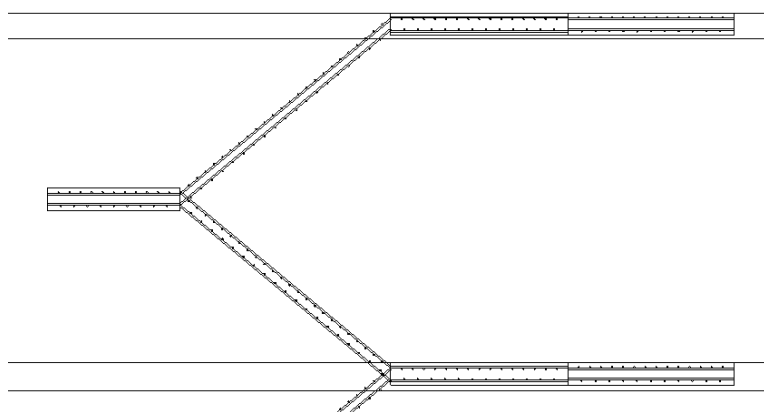
No orçamento, fica em falta a medição do volume de betão, área de cofragem e armaduras adicionais necessários para a execução dos degraus das escadas.



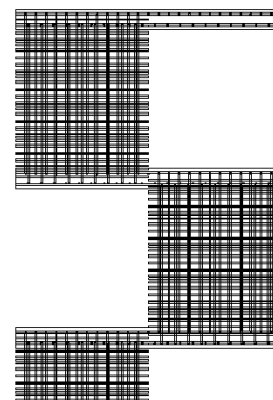
a) Lajes do 2º ao 4º piso – Armadura inferior



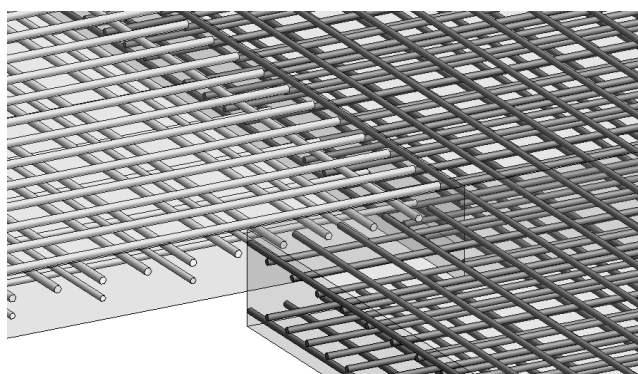
b) Lajes do 2º ao 4º piso – Armadura superior



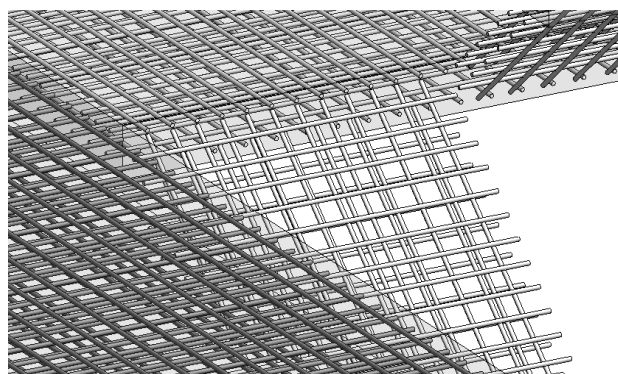
c) Escadas – Perfil 1



d) Escadas – Perfil 2



e) Ligação Consola c/Pavimento interior



f) Ligação Zona Comum c/Pavimento interior

Figura II.8 – Representações em planta e 3D das armaduras em Revit

Na figura Anexo II 0.6 e) e f) podemos distinguir os modelos de armadura criados através da ferramenta *Area* dos elementos criados a partir do *add-in*. Esta distinção é feita a partir da cor dos elementos, os elementos cinza-escuros são os que foram criados em Revit, os elementos cinza-claros são os que são gerados pelo Dynamo.

Vigas

Tabela II.13 – Soluções de armadura aplicadas

| Secção | | Solução de armadura | | | | |
|--------|----|---------------------|--------------|----------|--------------|-------------|
| H | B | Superior | | Inferior | | Transversal |
| | | Base | Momento Máx. | Base | Momento Máx. | Máxima |
| 40 | 30 | 2Ø10 | + 3Ø16 | 2Ø10 | + 5Ø8 | Ø6//0,10 |
| 30 | 30 | 2Ø25 | + 2Ø25 | 2Ø12 | + 2Ø10 | Ø10//0,10 |
| 25 | 55 | 2Ø20 | + 2Ø20 | 2Ø20 | -- | Ø8//0,10 |
| 25 | 50 | 2Ø20 | + 2Ø20 | 2Ø20 | -- | Ø8//0,10 |
| 25 | 35 | 2Ø20 | + 4Ø20 | 2Ø20 | -- | Ø10//0,10 |
| 20 | 20 | 2Ø12 | -- | 2Ø12 | -- | Ø6//0,20 |

Tabela II.14 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes

| Secção | | My (kN*m) | | | | Fz (kN) | |
|--------|----|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| H | B | M _{Sd} ⁻ | M _{Rd} /M _{Sd} | M _{Sd} ⁺ | M _{Rd} /M _{Sd} | V _{Sd} Máx. | V _{Rd} /V _{Sd} |
| 40 | 30 | 82 | 1,039 | 41 | 1,175 | 157 | 1,004 |
| 30 | 30 | 107 | 1,004 | 31 | 1,008 | 260 | 1,177 |
| 25 | 55 | 73 | 1,014 | 49* | -- | 151 | 1,032 |
| 25 | 50 | 54 | 1,056 | 19 | 2,083 | 149 | 1,046 |
| 25 | 35 | 79 | 1,047 | 11* | -- | 217 | 1,104 |
| 20 | 20 | 10 | 1,099 | 6 | 1,83 | 34 | 1,006 |

(*) – Estes valores de flexão são resultado de uma inversão no sentido dos esforços nas zonas dos apoios devido às ações sísmicas. Como o programa não possui a opção de atribuir armaduras nos apoios para a face inferior das vigas este só conta com os dois varões de canto da armadura base para resistir aos esforços, desta forma a segurança não se verifica.

Tabela II.15 – Orçamentação

| Secção | | Betão | | Cofragem | | Armaduras | |
|----------|----|----------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| H | B | Volume | Custo | Área | Custo | Peso | Custo |
| 40 | 30 | 11,30 m ³ | 828,30 € | 103,40 m ² | 2 068,00 € | 605,30 kg | 438,10 € |
| 30 | 30 | 32,26 m ³ | 2 371,96 € | 323,01 m ² | 6 457,20 € | 3097,77 kg | 2 175,54 € |
| 25 | 55 | 6,60 m ³ | 488,00 € | 50,70 m ² | 1 015,00 € | 774,40 kg | 545,30 € |
| 25 | 50 | 11,00 m ³ | 807,70 € | 88,00 m ² | 1 760,00 € | 1004,30 kg | 1 306,00 € |
| 25 | 35 | 6,50 m ³ | 480,20 € | 63,50 m ² | 1 270,50 € | 1300,20 kg | 904,20 € |
| 20 | 20 | 2,10 m ³ | 152,70 € | 31,20 m ² | 624,00 € | 220,40 kg | 155,00 € |
| Σ | | 69,76 m³ | 5 128,86 € | 659,74 m² | 13 194,70 € | 7002,37 kg | 5 524,14 € |

Os resultados obtidos no dimensionamento das vigas têm algumas particularidades. A primeira é relativa à solução das armaduras. Estas não podem ser consideradas soluções finais visto que seria necessário aplicar elementos adicionais para resistir a esforços que não foram considerados, alterar a geometria de alguns elementos para ter um melhor comportamento global sísmico da estrutura e reduzir alguns dos esforços nas vigas, principalmente as vigas interiores que são as mais afetadas por estes esforços sísmicos.

O outro ponto é referente ao orçamento, a área de cofragem e o respetivo custo acabam por ser agravados substancialmente devido às vigas interiores. Como as vigas interiores se encontram embebidas nas lajes, a cofragem das mesmas já se encontra contabilizada na medição da área e custo de cofragem das lajes. No aço, é possível que exista um défice relativo ao possível custo real, devido à falta de elementos de armadura e às amarrações irregulares. O programa criado não cumpre de forma detalhada os requisitos de amarração exigidos em regulamento.

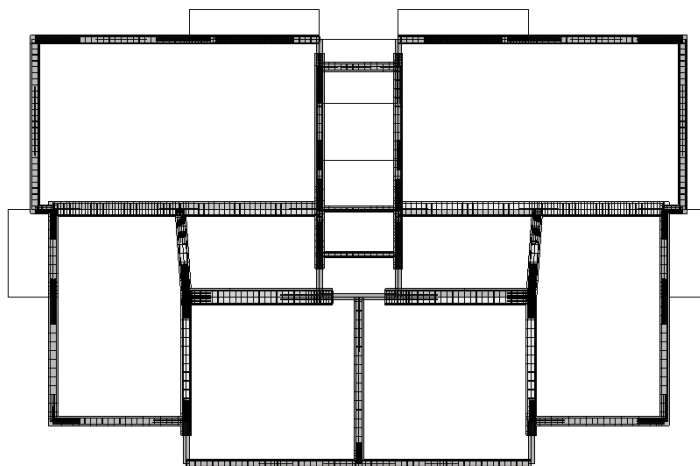


Figura II.9 – Vista em planta dos modelos de armaduras em vigas

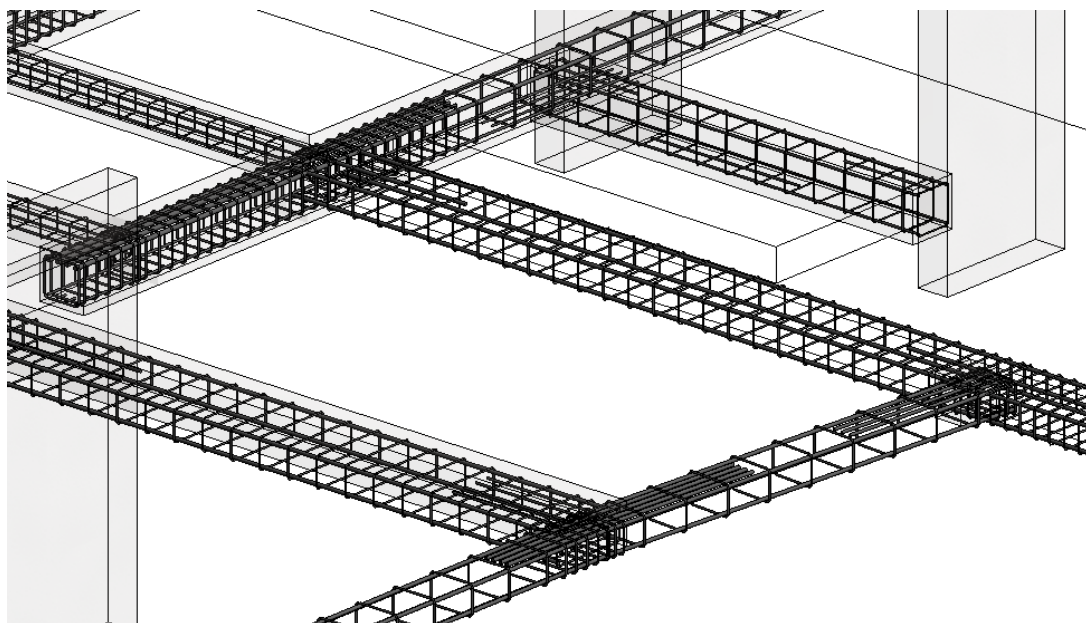


Figura II.10 – Visualização parcial dos modelos de armaduras aplicados num dos pisos

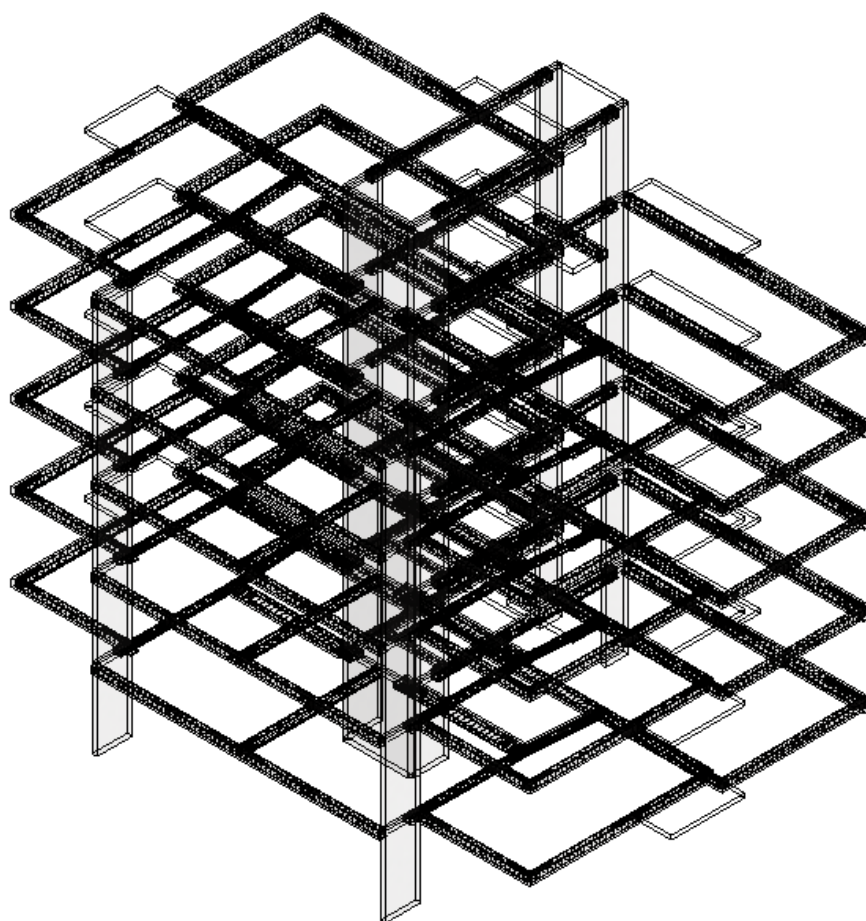


Figura II.11 – Vista 3D de todos os modelos de armaduras de vigas

Pilares

Tabela II.16 – Soluções de armadura aplicadas

| Secção | | Longitudinal | | Transversal | |
|----------|-------------------------|--------------|------------------------|-------------|-----------|
| | | Canto | Intermédia | Apoios | Vão |
| Interior | 50 x 50 cm ² | 4Ø20 | 16Ø16 (4Ø16/L) | Ø6//0,15 | Ø6//0,225 |
| | 40 x 60 cm ² | 4Ø20 | 16Ø16 (3Ø16/I; 5Ø16/L) | Ø6//0,15 | Ø6//0,225 |
| Exterior | 50 x 50 cm ² | 4Ø20 | 16Ø20 (4Ø20/L) | Ø6//0,15 | Ø6//0,225 |
| | 40 x 60 cm ² | 4Ø20 | 14Ø20 (3Ø20/I; 4Ø20/L) | Ø6//0,15 | Ø6//0,225 |

L – Maior dimensão do pilar; I – Menor dimensão do pilar; nØx/I – n varões de diâmetro x por face

Tabela II.17 – Coeficientes de segurança mínimos – Casos condicionantes

| Secção | | Compressão (kN) | | Flexão Y' (kN*m) | | Flexão Z' (kN*m) | | Flexão Desviada | Transverso (kN) | |
|----------|-------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
| | | Fx | N _{Rd} /N _{Sd} | My | M _{Rd} /M _{Sd} | Mz | M _{Rd} /M _{Sd} | FS | Fy,z | V _{Rd} /V _{Sd} |
| Interior | 50 x 50 cm ² | 1911 | 3,64 | 122 | 2,11 | 155 | 1,66 | 1 | 55 | 2,04 |
| | 40 x 60 cm ² | 1478 | 4,60 | 190 | 1,44 | 96 | 2,34 | 1 | 90 | 1,52 |
| Exterior | 50 x 50 cm ² | 2173 | 3,54 | 168 | 1,96 | 174 | 1,89 | 0,94 | 55 | 2,04 |
| | 40 x 60 cm ² | 2180 | 3,33 | 219 | 1,56 | 135 | 1,89 | 1 | 90 | 1,52 |

Tabela II.18 – Orçamentação

| Secção | | Betão | | Cofragem | | Armaduras | |
|----------|-------------------------|----------------------|------------|-----------------------|------------|------------|------------|
| | | Volume | Custo | Área | Custo | Peso | Custo |
| Interior | 50 x 50 cm ² | 7,88 m ³ | 617,40 € | 63,00 m ² | 1 260,00 € | 1183,69 kg | 822,90 € |
| | 40 x 60 cm ² | 15,75 m ³ | 1 234,80 € | 126,00 m ² | 2 520,00 € | 3262,60 kg | 2 263,60 € |

| | | | | | | | |
|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Exterior | 50 x 50 cm ² | 34,02 m ³ | 2 667,15 € | 283,50 m ² | 5 670,00 € | 6641,45 kg | 4 610,25 € |
| | 40 x 60 cm ² | 9,07 m ³ | 711,24 € | 75,60 m ² | 1 512,00 € | 1420,42 kg | 987,48 € |
| Σ | | 66,72 m³ | 5 230,59 € | 548,10 m² | 10 962,00 € | 12508,17 kg | 8 684,23 € |

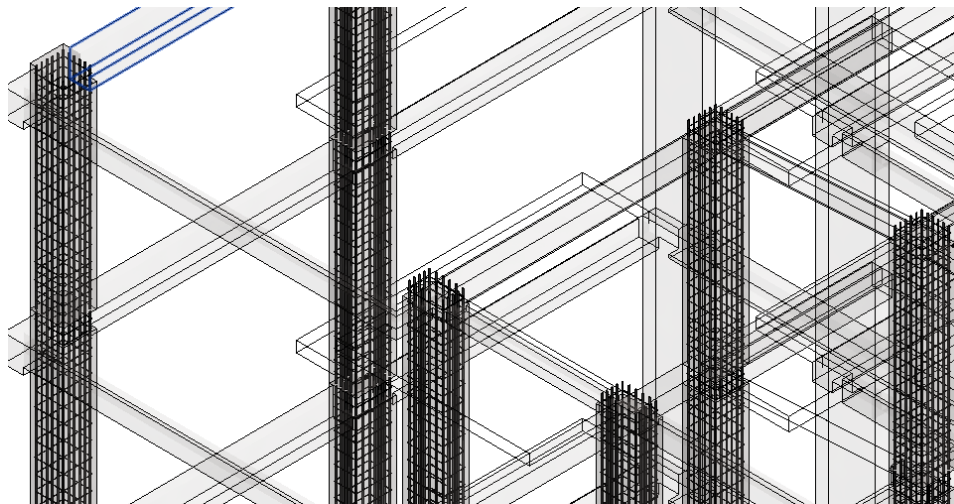


Figura II.12 – Vista parcial dos modelos de armadura em pilares

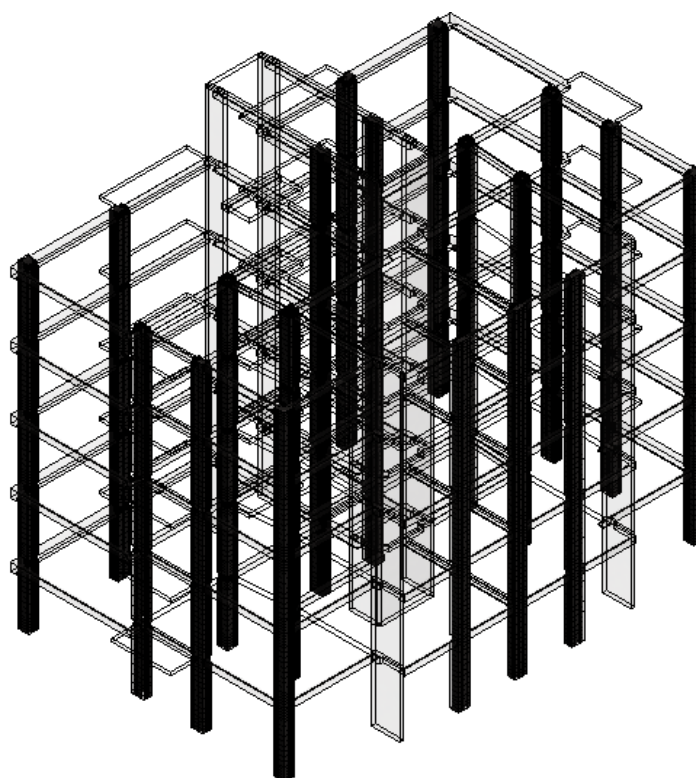


Figura II.13 – Vista 3D de todos os modelos de armaduras em pilares

Na modelação foram detetados alguns problemas, relacionados com o posicionamento dos varões longitudinais, onde alguns dos elementos se encontravam fora da sua posição. Isto indica que o programa ainda precisava de algum tempo para refinamento, mas as ferramentas base do programa permitiram facilmente corrigir estes desacertos.

Conclusões

Tabela II.19 – Orçamentação Global

| Elemento Estrutural | Betão | | Cofragem | | Aço | |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | Volume | Custo | Área | Custo | Peso | Custo |
| Lajes | 349,63 m ³ | 25 673,78 € | 1472,08 m ² | 29 441,66 € | 76927,3 kg | 53 079,83 € |
| Vigas | 69,76 m ³ | 5 128,86 € | 659,74 m ² | 13 194,70 € | 7002,37 kg | 5 524,14 € |
| Pilares | 66,72 m ³ | 5 230,59 € | 548,10 m ² | 10 962,00 € | 12508,17 kg | 8 684,23 € |
| Σ | 486,11 m³ | 36033,23 € | 2679,92 m² | 53 598,36 € | 96437,84 kg | 67 288,2 € |

Os resultados obtidos, tanto para a orçamentação como para as soluções de armadura, não podem ser considerados como resultados inteiramente fiáveis. A folha de cálculo desenvolvida é uma versão muito primária do que pode ser uma folha de dimensionamento estrutural interligada com um *software* de modelação estrutural e de pormenorização de elementos de betão armado.

Como já foi referido, é novamente reforçada a ideia de que a utilização deste tipo de ferramentas para a pormenorização global de uma estrutura possa não ser a melhor opção. Existe essa possibilidade, mas explorá-la obriga a consumir tempo que pode ser usado para a execução de projetos.

A criação de ferramentas de apoio para o cálculo ou a modelação individual de elementos estruturais é muito mais rápida, fácil de executar e os resultados obtidos, neste momento, trazem mais vantagens aos projetistas e aos dados de projeto guardados no modelo BIM.

Esta foi uma demonstração de algumas capacidades dessa interação entre programas de modelação e de cálculo, facilitada por *software* de apoio e alguma programação com linguagem mais simples. Os resultados que se atingiram permitiram compreender o funcionamento deste tipo de ferramentas e perceber que a liberdade para criação e desenvolvimento individual deste tipo de utensílios trazem vantagens e oportunidades às mais diversas entidades envolvidas em projeto.

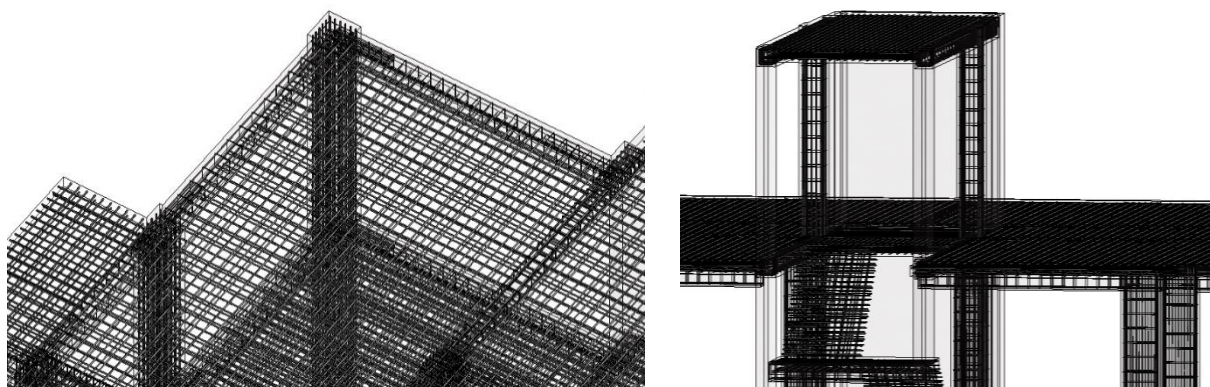


Figura II.14 – Vistas parciais do modelo estrutural com todos os elementos de armadura